

# 多级串联密封系统泄漏仿真与实验研究

刘 阳\* 于建平 孙 冲 崔展鹏 刘占卿  
(北京特种工程设计研究所,北京 100028)

## Evaluation and Simulation of Leakage of Multi-Level Series Seal

Liu Yang\*, Yu Jianping, Sun Chong, Cui Zhanpeng and Liu Zhanqing  
(Beijing Special Engineering Design Institute, Beijing 100028, China)

**Abstract** Mathematical models have been successfully developed to numerically simulate leakage of the multi-level series seal. In the leakage simulation of 3-level series seal, the relationship between the leakage rate, leak quantity, and time was evaluated. In this case, the simulated and the experimental results agree fairly well, showing the simulation works. The rules derived from the simulation may work well in design of multi-level series seal, leak detection and safety evaluation of high pressure tanks.

**Key words** Multilevel series seal structure, Leakage, Mathematical model building, Simulation, Experiment

**摘要** 建立了多级串联密封系统的数学模型,通过理论分析和数值计算,揭示了多级串联密封结构正压泄漏的漏率、漏量与泄漏时间关系的一般规律。给出了三级密封系统泄漏的仿真计算实例。通过三级串联密封泄漏实验验证了多级串联密封泄漏理论的正确性。该泄漏规律可用于多级串联密封结构系统的设计、检漏和泄漏安全评估。

**关键词** 多级串联密封结构 泄漏 数学建模 仿真 实验

中图分类号:TB774;TN107 文献标识码:A 文章编号:1672-7126(2005)02-0127-07

密封技术在压力容器、真空设备、液压机械、输送管线等工业应用非常广泛。但国防试验设备、武器装备、航空航天、特种化工等领域对密封技术提出了更高的要求。因此,为提高密封系统的密封性和安全可靠,许多密封系统或结构常常采用多级串联密封结构。由于密封级之间寄生空间的存在,多级串联密封结构的泄漏过程和机理与单级密封结构不同,其泄漏过程非常复杂,需要进行深入的理论、试验与应用方法的研究。

近年来,国内外逐渐开始重视多级串联密封结构的泄漏过程的研究。美国 NASA 的 Lemon 等<sup>[1]</sup>研究了在多道 O 型圈密封情况下估算泄漏率的经验方法。Rodriguez 等<sup>[2]</sup>研究了双密封结构泄漏过程建模求解的近似方法。Levy 等<sup>[3]</sup>研究了多密封结构检漏的经验方法。沈公槐等<sup>[4]</sup>讨论了测定两密封件串联的气路系统各密封件单密封漏率的问题。龙伟<sup>[5]</sup>给出了描述双密封泄漏的微分方程。此前,笔者所在课题组<sup>[6]</sup>研究了串联双密封结构的建模与仿真问题,总结了双密封结构的泄漏规律及

其应用方法。本文进一步研究多级串联密封结构的建模与仿真,并完成了一系列验证性实验<sup>[7]</sup>。

### 1 系统建模方法

气路系统由气压源、气流源、气阻、气容等元件构成,均有明确的元件定义、表示、特性和单位量纲,遵守相应的元件特性约束和气路拓扑约束<sup>[7]</sup>。

例如,流阻定义为具有阻碍气体流通能力的气路元件,用  $R$  表示,  $R = P/Q$ , 单位  $s/m^3$ 。刚性漏孔的流阻是与泄漏管道(路径)的几何形状、尺寸、以及气体种类和流动状态等有关的量。流导等于流阻的倒数,用  $C$  表示,  $C = 1/R$ , 单位  $m^3/s$ , 表示管道或漏孔对气体的导通能力。

在气路系统中,流阻串联后的总流阻等于各段流阻之和,流阻并联后的总流阻倒数等于各支路流阻倒数之和。

气路拓扑约束是指气路系统遵循支路气压守恒和节点气流守恒。支路气压守恒是指气路中的任一支路气压守恒,即气压之和为零。节点气流守恒是指气路中任一节点处的气流守恒,即气流之和为零。

收稿日期:2004-07-26

\*联系人:博士,高级工程师, E-mail:liuyang-nudc@yahoo.com, Tel:010-66358605

### 1.1 密封系统建模

密封系统是气路系统的一种,密封结构系统中的元件建模方法可归纳如下:

密封件的漏孔可视为气阻元件,其属性为流阻  $R$ ,漏孔的气体流量称为漏率  $Q$ 。密封系统中密封件之间的寄生容积是气容,其容积  $V$  为常量。密封空间实际上是有零输入的气容,当其容积非常大或其衍生漏孔的流阻非常大时,该气容可视为理想的气压源。外界地球大气环境等效于气压为 101 kPa 的理想气压源。宇宙空间的高真空不境,以及密封系统接有氦检漏仪处于检漏状态时,等效于气压为零的等效接地。

### 1.2 漏孔的气阻特性

明确气路中气阻的“气压/气流”特性关系是密封系统建模并求解的关键环节。

在真空领域中,常把气体在漏孔中流动界定为分子流、粘滞流、湍流和声速流四种状态。这种气流状态的划分又取决于漏孔的直径  $D$ 、长度  $l$  和气体分子的平均自由程  $\lambda$ ,而分子的平均自由程又是气体温度、气体粘度、气体压强的函数,即  $Q_f = Q_f(P_1, P_2, M_1, M_2, T, \dots, C)$ 。综合有关资料和文献<sup>[4-7]</sup>,已知气阻的标准漏率  $Q_{SLR}$ 和压强等条件,可简便计算分子流和粘滞流状态的漏率。

$$Q_f = P/R = \begin{cases} Q_{SLR}(P_2 - P_1) \sqrt{M_1/M_2} & \text{分子流状态} \\ Q_{SLR}(P_2^2 - P_1^2) \sqrt{M_1/M_2} & \text{粘滞流状态} \\ Q_{SLR}f_T(P_1, P_2, M_1, M_2) & \text{湍流状态} \\ Q_{SLR}f_S(P_1, P_2, M_1, M_2) & \text{声速流状态} \end{cases} \quad (1)$$

上式中,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $M_1$ 、 $M_2$  分别为漏孔两端的压强和平均分子量,  $T$  为环境温度,  $f_T$  为气流粘滞系数,  $C$  为与漏孔结构参数有关的量,  $f_T$ 、 $f_S$  为湍流和声速流状

态下的气阻状态变量函数。按照定义,气阻在分子流状态近似常量,粘滞流状态为简单的双曲变量,湍流和声速流状态的气压气阻为复杂的非线性关系,其近似计算公式需进一步研究。

本文在建模求解过程中不考虑系统温度和示漏气体的扩散时间。限于篇幅,仅介绍多级串联密封系统的正压分子流状态的建模求解和仿真。

## 2 串联密封结构建模与求解

典型的  $N$  级串联密封结构系统如图 1(a) 所示,根据前述密封系统建模方法,可得到其正压泄漏状态气路模型如图 1(b) 所示。系统参量和条件见表 1。该气路有  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\dots$ 、 $R_N$  共  $N$  个气阻,有  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $\dots$ 、 $V_{N-1}$  共  $N-1$  个寄生气容。分析以上气路系统,该

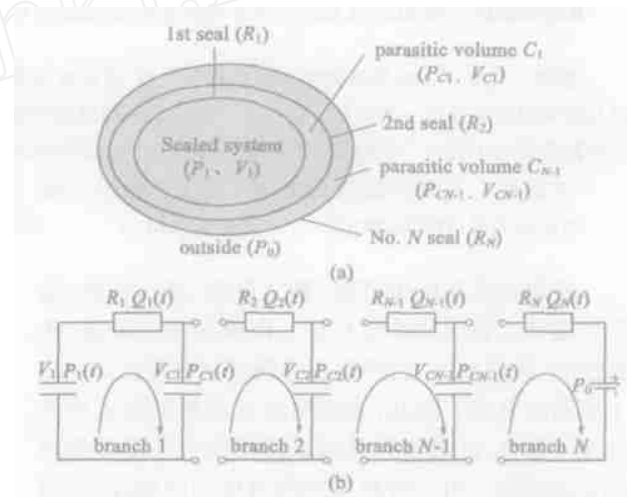


图 1 串联密封结构与其气路模型 ( $P_{10} > P_0$ )

(a)  $N$  级串联密封结构 (b)  $N$  级串联密封结构模型

Fig. 1  $N$ -level series seal structure and its gas circuit model

(a)  $N$ -level series seal structure

(b) Gas circuit of  $N$ -level series seal

表 1  $N$  级串联密封结构系统参量与条件

Tab. 1 Parameters and conditions of  $N$ -level series seal

参量类型	名称	说明
整体参量	$V_1: P_1(t), V_1, M_1$	密封空间 $V_1$ 的压强、容积和平均分子量
	$R_n: R_n, Q_n(t), G_n(t)$	密封件 $R_n(1 \sim N)$ 的流阻、漏率和漏量
	$P_0: P_0, M_0$	大气环境 $P_0 = 1.01 \times 10^5 Pa$
	$V_{Cn}: P_{Cn}(t), V_{Cn}, Q_{Cn}(t), G_{Cn}(t), M_{Cn}(t)$	寄生容积 $V_{Cn}(1 \sim N-1)$ 内压力、容积、漏率、流入量和平均分子量
示漏分量参量	$V_1: P_{1S}(t)$	密封空间 $V_1$ 内的示漏气体分压
	$R_n: Q_{nS}(t), G_{nS}(t)$	气阻 $R_n(1 \sim N)$ 的示漏漏率和漏量分量
	$V_{Cn}: P_{CnS}(t), Q_{CnS}(t), G_{CnS}(t)$	寄生容积 $V_{Cn}(1 \sim N-1)$ 内的示漏分压、漏率和流入量
初始条件	$P_1(0) = P_{10}, P_{1S}(0) = P_{1S0}, P_{Cn}(0) = P_{Cn0} = P_0, P_{CnS}(0) = 0, Q_n(0) = Q_{nS}(0) = 0(n > 1)$ ; 泄漏量初始值均为 0	
终结条件	$P_1(\infty) = P_{Cn}(\infty) = P_0$ , 其余参量均为 0	

气路可化为 N 个支路。除支路 1 和支路 N 外,每一支路均包括 1 个气阻和 1 个寄生气容。因此,分别对每个支路单元进行独立建模,然后 N 个支路联立求解,即可解出整个气路的泄漏过程。

对第 1 个支路和第 N 个支路的气路元件  $R_1$ 、 $R_N$ 、 $V_1$ 、 $V_N$  应用元件约束、节点气流守恒和支路气压守恒原理,建立数学描述方程:

$$\text{气阻 } R_1: Q_1(t) = (M_{C1}(t) / M_1)^{1/2} (P_1(t) - P_{C1}(t)) / R_1$$

$$Q_{1S}(t) = Q_1(t) P_{1S}(t) / P_1(t)$$

$$\text{气阻 } R_N: Q_N(t) = (M_0 / M_{CN-1}(t))^{1/2} \cdot (P_{CN-1}(t) - P_0) / R_N$$

$$Q_{NS}(t) = Q_N(t) P_{CN-1S}(t) / P_{CN-1}(t)$$

$$\text{气容 } V_1: P_1(t) V_1 = P_{10} V_1 - Q_1(t) dt$$

$$P_{1S}(t) / P_1(t) = P_{1S0} / P_{10}$$

$$\text{气容 } V_{C1}: P_{C1}(t) V_{C1} = P_{C10} V_{C1} + Q_{C1}(t) dt$$

$$Q_{C1}(t) = Q_1(t) - Q_2(t)$$

$$Q_{C1S}(t) = Q_{1S}(t) - Q_{2S}(t)$$

第 n(2 ≤ n ≤ N - 1) 个支路,可按如下方法建模:

(1) 第 n(1 ≤ n ≤ N - 1) 个寄生气容内平均分子量  $M_{Cn}(t)$  密封系统内外的气体的平均分子量  $M_1$ 、 $M_0$  可认为恒定不变。随着寄生气容  $V_{Cn}$  内空气与泄漏介质的浓度不同,平均分子量  $M_{Cn}(t)$  是寄生气容内示漏气体分压与总压的函数关系:

$$M_{Cn}(t) = F(P_{Cn}(t), P_{CnS}(t)), (1 \leq n \leq N - 1) \quad (2)$$

即 t:0 过程中,  $M_{Cn}(t) : M_0 \rightarrow M_1$ 。已知某时刻 t 时寄生气容内的气体种类和所占分压即可容易地计算出其平均分子量  $M_{Cn}(t)$ 。

(2) 第 n(2 ≤ n ≤ N - 1) 个气阻的状态模型

对气阻  $R_n(2 \leq n \leq N - 1)$  有:

$$Q_n(t) = (M_{Cn}(t) / M_{Cn-1}(t))^{1/2} (P_{Cn-1}(t) - P_{Cn}(t)) / R_n \quad (3)$$

$$Q_{nS}(t) = Q_n(t) P_{nS}(t) / P_n(t) \quad (4)$$

(3) 第 n(2 ≤ n ≤ N - 1) 个寄生气容的状态模型

对寄生气容  $V_{Cn}(2 \leq n \leq N - 1)$  有:

$$P_{Cn}(t) V_{Cn} = P_{Cn0} V_{Cn} + Q_{Cn}(t) dt \quad (5)$$

$$Q_{Cn}(t) = Q_{n-1}(t) - Q_n(t) \quad (6)$$

$$Q_{CnS}(t) = Q_{n-1S}(t) - Q_{nS}(t) \quad (7)$$

对 N 级串联密封结构系统的气路元件的数学方程进行联立求解,得到 N 个一阶常微分方程组,代入消元后得到 N 阶常系数线性微分方程,易求  $P_1$

(t):

$$P_1(t) = f_1(t, t^{r-1}, e^{-t}) \quad (8)$$

式中,  $r$  为  $P_1(t)$  方程的特征值和重根数。然后可求得整个系统的其他整体变量和分变量。

系统各变量的随时间变化趋势如图 2 所示,其主要泄漏规律可概括如下:

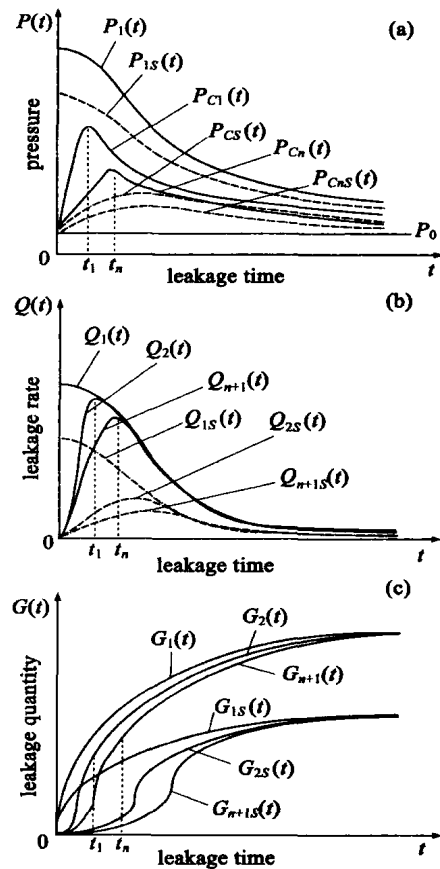


图 2 N 级串联密封结构各压强、漏率变化曲线 ( $P_{10} > P_0$ )

(a) 压强变化曲线 (b) 漏率变化曲线 (c) 漏量变化曲线  
Fig. 2 Time evolutions of the pressure and leakage rate in a N-level seals

(a) Pressure curve (b) Leakage rate curve (c) Leakage quantity curve

(1) 总压平衡: t:0 过程中,对整个系统有总压平衡点  $t_N$ ,总压平衡时:  $Q_1(t_N) = Q_2(t_N) = \dots = Q_N(t_N)$  属瞬态平衡,总压平衡后所有气阻的漏率保持近似相同,逐渐减小,直至泄漏结束。

(2) 示漏分压平衡: t:0 过程中,系统的各寄生气容中的示漏气体分压(示漏气体浓度)趋向于平衡值,即  $P_{CnS}(t) / P_{Cn}(t)$  趋向并接近  $P_{1S0} / P_{10}$ 。

(3)  $Q_{N-1S}(t)$  是整个系统的示漏气体漏率,它首先随着寄生容积内的分压  $P_{CN-1S}(t)$  的升高而缓慢升高,然后随着  $Q_{N-1}(t)$  的迅速减小而减小。

(4) 泄漏时间随各漏孔的气阻增大而增加。

若密封系统的  $P_{10}V_1$  和系统时间常数均较小,泄漏时间较短,且要求精确地进行泄漏全过程求解时,可按照该方法进行建模和求解。

### 3 简化建模及求解

对微漏或较大容积密封系统而言,气容  $V_1$  可视理想气压源  $P_{10}$ ,即  $P_1(t) \approx P_{10} > P_0$ 。N 级串联密封结构的气路模型简化为图 3。系统初始和终结条件见表 2。

表 2 N 级串联密封结构系统条件

Tab. 2 conditions of N-level series seal

参量	说明
初始条件	$P_1 = P_{10}, P_{1S}(0) = P_{1S0}, P_{Cn}(0) = P_{Cn0} = P_0, P_{CnS}(0) = 0, Q_n(0) = Q_{nS}(0) = 0 (n > 1)$ ; 泄漏量初始值均为 0
终结条件	(1) 总压平衡: $Q_1(t) = Q_2(t) = \dots = Q_N(t), (1 \leq n \leq N)$ (2) 分压平衡: $P_{CnS}(t) / P_{Cn}(t) = P_{1S0} / P_{10}, (1 \leq n \leq N-1)$

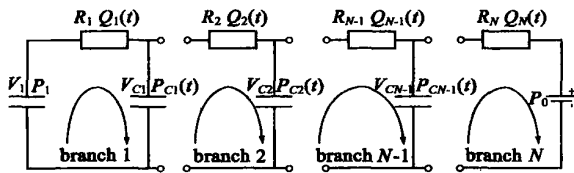


图 3 N 级串联密封结构简化气路模型 ( $P_{10} > P_0$ )

Fig. 3 Simplified gas circuit of N-level series seal

考虑到总压平衡至分压平衡,寄生容积内气体平均分子量逐渐接近密封系统内气体平均分子量,为方便求解,简化计算,可近似认为  $M_c(t) = M_1$ 。

除气阻  $R_1$  和气容  $V_1$  外, N 级串联密封结构简化模型的每个元件均按前节方法建立数学方程:

$$Q_1(t) = (M_{C1}(t) / M_1)^{1/2} (P_1 - P_{C1}(t)) / R_1$$

$$Q_{1S}(t) = Q_1(t) P_{1S}(t) / P_1(t)$$

气容  $V_1: P_1 = P_{10}, P_{1S}(0) = P_{1S0}$

在给出具体密封结构的情况下,可建立气路模型,联立方程求解。求解上述 N 级串联密封结构模型的解析解比较复杂,系统各变量随时间变化趋势如图 4 所示。

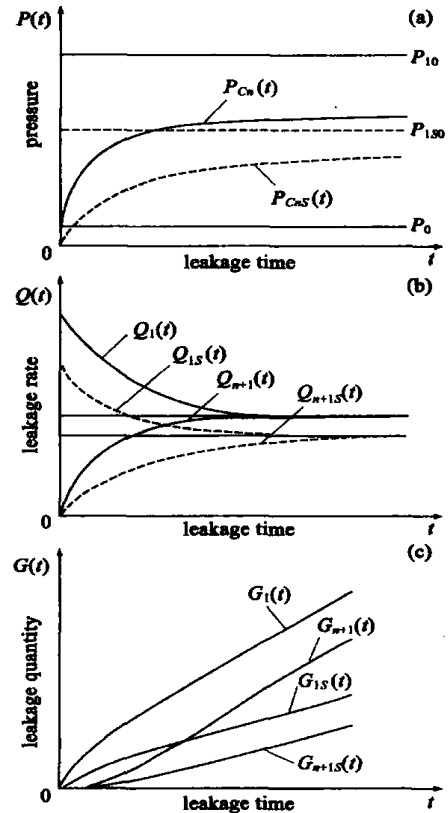


图 4 N 级串联密封结构系统状态参量变化曲线 ( $P_{10} > P_{C0} = P_0$ )

(a) 压强变化曲线 (b) 漏率变化曲线 (c) 漏量变化曲线  
Fig. 4 Curve charts of (a) pressure, (b) leakage rate and (c) Leakage quantity of N-level series seal structure in balance leakage process

多级串联密封结构的系统结构参数和初始条件对各变量的变化影响复杂,但在  $P_{10} > P_0$  条件下,其泄漏规律可概括如下:

- (1) 总压平衡:  $t:0$  过程中,对整个系统有总压平衡点  $t$ ,总压平衡时:  $Q_1(t) = Q_2(t) = \dots = Q_N(t)$ 。
- (2) 示漏分压平衡:  $t:0$  过程中,系统的各寄生容积中的示漏气体分压(示漏气体浓度)趋向于平衡值,即  $P_{CnS}(t) / P_{Cn}(t)$  趋向并接近  $P_{1S0} / P_{10}$ 。
- (3)  $Q_{N-1S}(t)$  是整个系统的示漏气体漏率,它首先随着寄生容积内的分压  $P_{CN-1S}(t)$  的升高而缓慢升高,最后稳定。
- (4) 泄漏过程的总压和分压平衡时间随各漏孔的气阻值增大而增加。

若多级串联密封系统的  $P_{10}V_1$  较大,且主要注重泄漏的平衡过程,可按该方法进行建模和求解。

表 3 某三级串联密封结构不同初始条件及其泄漏平衡过程计算( = 0.05)

Tab.3 Initial conditions and their simulation results of a 3-level series seal

序号	系统结构参数					系统初始状态							仿真计算/实验结果			
	$V_{C1}$	$V_{C2}$	$Q_{1b}$	$Q_{2b}$	$Q_{3b}$	$P_1$	$P_{1S0}$	$P_{C10}$	$P_{C1S0}$	$P_{C20}$	$P_{C2S0}$	$P_0$	$Q_3$	$Q_{3S}$	$T_1$	$T_2$
1	10	50	1e-6	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.33e-7	1.58e-7	3.54	17.33
2	10	50	1e-6	1e-6	1e-7	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	8.33e-8	3.96e-8	11.93	81.48
3	10	50	1e-6	1e-7	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	8.33e-8	3.96e-8	4.27	59.27
4	10	50	1e-7	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	8.33e-8	3.96e-8	4.99	58.78
5	10	50	1e-7	1e-7	1e-7	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.33e-8	1.58e-8	35.39	173.33
6	10	50	1e-6	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0	6.68e-7	3.17e-7	2.54	5.22
7	10	50	1e-6	1e-6	1e-7	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0	1.66e-7	7.91e-8	9.71	37.66
8	10	50	1e-6	1e-7	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0	1.66e-7	7.93e-8	6.02	10.11
9	10	50	1e-7	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0	1.73e-7	8.23e-8	7.18	7.35
10	10	10	1e-6	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.33e-7	1.58e-7	1.14	5.35
11	100	100	1e-6	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.33e-7	1.58e-7	11.4	53.5
12	1000	1000	1e-6	1e-6	1e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.33e-7	1.58e-7	114	535
13	958	1829	0.97e-6	1.11e-6	1.25e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	1.01	3.66e-7	1.74e-7	136	668
14	958	1829	0.97e-6	1.11e-6	1.25e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0	7.32e-7	3.48e-7	91.5	211
15	958	1829	0.97e-6	1.11e-6	1.25e-6	2.02	1.01	1.01	0	1.01	0	0		3.67e-7		199

注: ——实验结果

### 4 仿真方法与算例

#### 4.1 仿真方法与仿真软件

当密封系统为两级以上串联组成时,建模方便,但解析求解非常困难。为此,引入时序迭代积分,利用数值计算的方法进行泄漏过程求解。

数学定义:

$$\int_{t_1}^{t_2} F(t) dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^{n-1} F(t_1 + i \cdot \Delta t) \Delta t$$

误差分析:  $\epsilon(t) = \int_{t_1}^{t_2} F(t) dt - \sum_{i=0}^{n-1} F(t_1 + i \cdot \Delta t) \Delta t$ , 那么当  $\Delta t \rightarrow 0$ ,  $\epsilon(t) \rightarrow 0$ 。

泄漏全过程的仿真计算结束条件为:

$$|(P_1(t) - P_0) / (P_{10} - P_0)| \leq \epsilon$$

简化模型的泄漏过程计算结束条件为

- (1) 总漏率稳定:  $|(Q_1(t) - Q_N(t) / Q_1(t)| \leq \epsilon$ ;
- (2) 示漏分压稳定:

$$P_{CN-1S}(t) / P_{CN-1}(t) = (1 - \epsilon) P_{1S0} / P_{10}$$

综合前述模型,利用 Matlab 和 VC 工具编制完成了“多级串联密封结构泄漏过程仿真系统”软件,该软件可进行泄漏过程的正、反解计算,方便地计算出多级串联密封结构的泄漏过程中任意时刻任意系统变量值,并直观地描绘出其泄漏过程曲线。

#### 4.2 算例

假设某三级串联密封结构,密封系统容积  $V_1$  较大,压力为  $P_1$ ,第一、二、三道密封的标准漏率为  $Q_{1b}$ 、 $Q_{2b}$  和  $Q_{3b}$ ,均为分子流状态,相邻两道密封之

间存在寄生容积  $V_{C1}$ 、 $V_{C2}$ ,按照较低正压泄漏和检

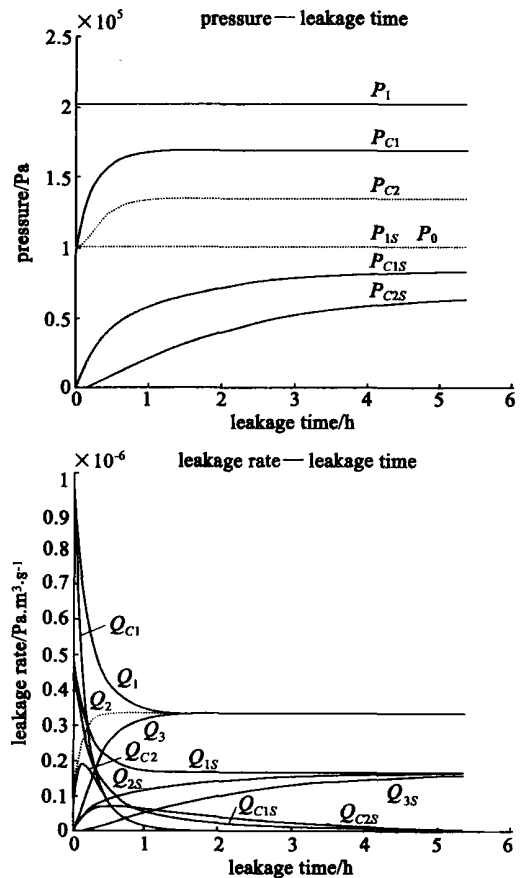


图 5 三级串联密封结构泄漏过程中压力、漏率变化曲线(序号 10)

Fig.5 Pressure and leakage rate curve charts of the 3-level series seal structure for No. 10

漏状态考虑, 设定为 0.05, 计算泄漏平衡时间和过程。表 3 为系统参数初始条件和计算结果。表中  $V_1$ 、 $V_{C1}$ 、 $V_{C2}$  单位  $\text{mm}^3$ ;  $Q_{1b}$ 、 $Q_{2b}$ 、 $Q_{3b}$  单位  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;  $P_{10}$ 、 $P_{1S0}$ 、 $P_{C10}$ 、 $P_{C1S0}$ 、 $P_{C20}$ 、 $P_{C2S0}$  为密封空间和寄生容积内总压力、示踪气体分压力的初始值, 单位  $10^5 \text{ Pa}$ ;  $Q_3$ 、 $Q_{3S}$  为第三道密封 (即系统整体) 的总漏率、示漏漏率, 单位  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;  $T_1$  漏率稳定时间,  $T_2$  示踪分压平衡时间, 单位 h。图 5 是序号 10 的泄漏平衡过程曲线。

## 5 实验

### 5.1 仪器与材料

氦质谱检漏仪 ZQJ-230E, 最小可检漏率  $5 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。自制实验装置。

### 5.2 实验方法

#### 5.2.1 实验装置

实验装置如图 6 所示, 由模拟密封系统、三级串联密封结构、检漏系统等组成。

(1) 模拟密封系统: 由容积约  $2 \text{ m}^3$  的前置压力容器、高压氦气瓶、减压阀组件、压力表及管件等组成, 为系统提供稳定的近似理想的恒压源。

(2) 三级串联密封结构: 是一特制的精密装置, 由前、中、后三道带针孔铝箔和二个集气小室组成, 二个集气室分别有微通道接数显压力表。针孔 1、针孔 2、针孔 3 为模拟漏孔, 经显微测定, 其直径分别约为  $0.31$ 、 $0.33$ 、 $0.34 \mu\text{m}$ 。两个集气小室 1、2 为模拟寄生气容, 经气体称重法定容, 其体积 (含微通道和相关容积) 分别为  $958$ 、 $1829 \text{ mm}^3$ 。

(3) 检漏系统: 由后置容器、氦质谱检漏仪、辅助真空泵等组成。后置容器的容积约  $1.1 \text{ m}^3$ , 在检测仪关机时, 为串联密封装置提供长时间真空状态  $P_0$ , 不改变串联密封装置的泄漏状态。

#### 5.2.2 标准漏率测定

经测定, 漏孔 1、漏孔 2、漏孔 3 的标准漏率分别为  $0.97 \times 10^{-6}$ 、 $1.11 \times 10^{-6}$ 、 $1.25 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

#### 5.2.3 实验过程

将前置容器充纯氦至  $2 \text{ atm}$  ( $2.02 \times 10^5 \text{ Pa}$ ), 使前置容器内氦气体积浓度达到  $50\%$ 。充气完成后, 利用辅助真空泵将后置容器抽真空至  $50 \text{ Pa}$  以下, 开始检漏, 检漏间隔为  $5 \text{ h}$ , 每次持续  $10 \text{ min}$ , 稳定后记录显示漏率。利用两个数显压力表读取两个集气小室内的压力, 记录频率为  $5 \text{ h}$ 。

### 5.3 实验结果分析

对该实验条件下的泄漏过程进行仿真, 结果见表 3 序 14, 总漏率平衡时间为  $91.5 \text{ h}$ , 分压平衡时间, 即示漏气体漏率平衡时间为  $211 \text{ h}$ 。  $P_{C1}$ 、 $P_{C2}$ 、 $Q_{3S}$  的实验实测结果与计算结果比较见图 7。

从图 7 的对比结果来看, 实测值与理论计算值基本一致, 但是实测值相对偏大, 最大误差约  $8\%$ 。经分析, 造成偏差的原因主要在于忽略了氦的扩散时间, 以及在检漏间隔内后置容器内的氦累积测量误差的影响等。

## 6 泄漏规律

(1) 串联级数与总漏率关系: 类似于多电阻串联的分压电路的规律, 在串联密封结构中, 由于每一道

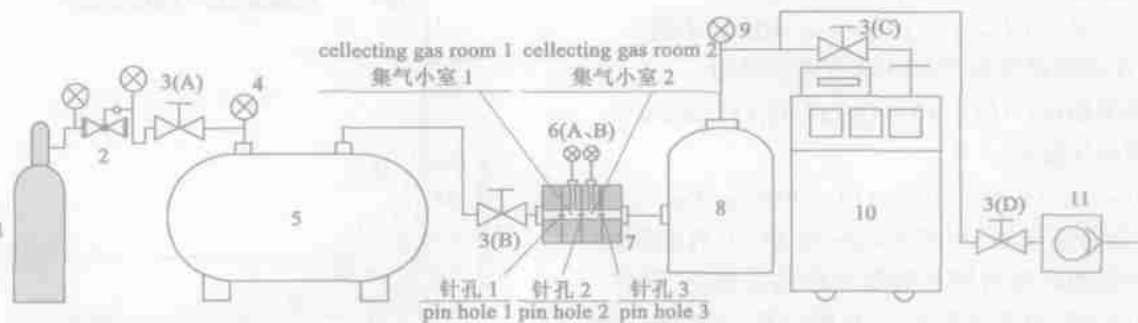


图 6 实验装置示意图

1 - 高压氦气瓶; 2 - 减压阀组件; 3 - 真空阀; 4 - 压力表; 5 - 前置容器; 6 - 数显压力表; 7 - 三级串联密封结构; 8 - 后置容器; 9 - 真空计; 10 - ZQJ-230E 氦检漏仪; 11 - 辅助真空泵  $2 \times Z-4$

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental set-up and detection system

1 - helium gas jar; 2 - pressure-reducing valve assembly; 3 - vacuum valve; 4 - pressure meter; 5 - fore chamber; 6 - digital pressure meter; 7 - 3-level series seal; 8 - chamber; 9 - vacuum gauge; 10 - ZQJ-230E helium leak detector; 11 -  $2 \times Z-4$  auxiliary vacuum pump

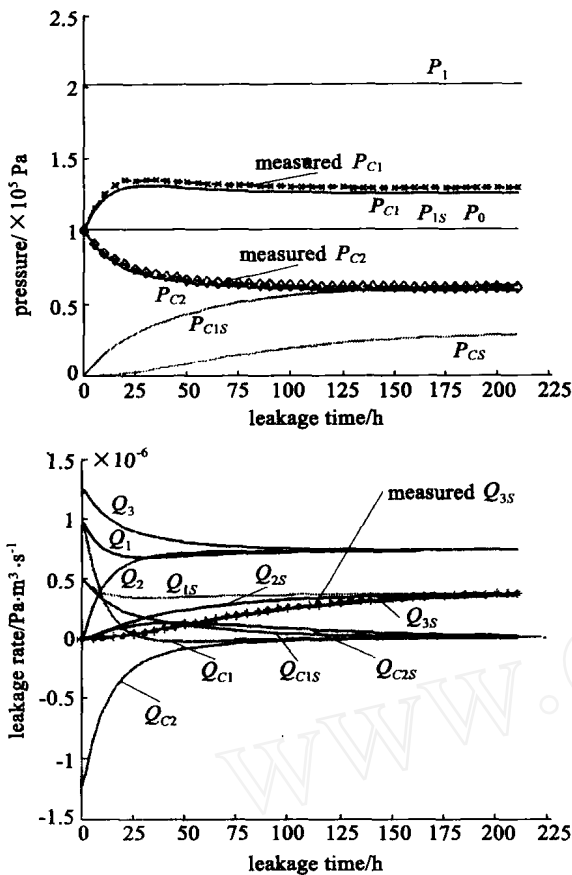


图 7 三级串联密封结构泄漏压力、漏率计算值与实验结果对比

Fig. 7 Simulation and measured results of leakage pressure and rate of the 3-level series seal

密封均承担一部分气压降,串联密封结构级联的级数越多,平衡后的总漏率越小。即多级串联结构的多个串联漏孔的总气阻为单个气阻之和,但总漏率上改善不太明显。但级数增多,会明显增加系统的平衡时间。例如,与单密封结构相比,同等条件下 3 级串联密封结构,(若  $R_1 = R_2 = R_3$ ) 平衡后漏率减为原来的三分之一。

(2) 寄生气容对泄漏过程的影响:从整个泄漏过程来看,串联密封结构间的寄生容积的存在和大小对漏率没有影响,不影响平衡后串联结构的整体漏率。寄生容积的存在和大小对整个密封系统的泄漏平衡时间影响很大,大的寄生容积可明显增大平衡时间,减小平衡前的漏率和漏量。

(3) 单级密封漏率对泄漏过程的影响:多级串联

密封结构中单个密封件标准漏率  $Q_{nb}$  大小对泄漏全过程影响很大,可在很大程度上影响整个泄漏过程的泄漏时间和漏率,而且对泄漏平衡时间影响也很大,小的漏率可明显增大平衡时间。

(4) 不同漏率的密封件的先后顺序对泄漏过程的影响:若多级串联密封结构中的某两密封件漏率不等,其前后位置对平衡后的漏率大小无影响,但对平衡时间有影响。若漏率小的密封件在外,则平衡时间较长;反之,则平衡时间较短。

(5) 示漏气体浓度对泄漏过程的影响:若多级串联密封结构中放入部分示漏气体,若不引起密封压力的改变,在不考虑气体分子量对漏率影响的情况下,示漏气体的浓度对泄漏过程没有影响,即不影响总漏率的变化,也不影响总压平衡和分压力平衡时间。

同样,串联密封结构的真空和其它泄漏状态,可以使用相同的泄漏模型,只是初始条件下不同,但遵循相似的泄漏规律。

## 7 结束语

本文通过理论分析、数值计算和实验,建立了多级串联密封结构的数学模型,揭示了多级串联密封结构的正压泄漏规律。串联密封结构的泄漏规律对于指导串联密封结构系统的设计、检漏和泄漏安全评估等具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 Lemon D K. Technology evaluation for space station atmospheric leakage[R]. PNL-7269, DE9000784, 1990
- 2 Rodriguez P L, Markevitch R. Two-level series seal leakage rate analysis and testing summary[R]. NASA TM-503604, 1999
- 3 Levy S. Design criteria for zero leakage connectors for launch vehicles[R]. N2001 - 18. NASA-CR-50560, 2001
- 4 沈公槐, 彭衷鸿. 串联密封系统泄漏率的测定[J]. 控制工程, 1998, (2): 1~5
- 5 龙 伟. 双密封结构泄漏过程浅析[J]. 真空与低温, 2001, 7(3): 184~186
- 6 刘 阳, 孙 冲, 崔展鹏等. 串联密封结构的泄漏规律研究[J]. 真空科学与技术学报, 2004, 24(2): 142~148
- 7 刘 阳, 孙 冲, 崔展鹏. 多级串联密封结构泄漏理论、试验与应用研究[R]. No. GF01220030401, 2003
- 8 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, (2): 42~46