

氦气透平压气机组合弹性环密封试验研究

王 旭¹, 徐莉华¹, 单世奎², 钟阿霞¹

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036;

2. 哈尔滨电机有限责任公司生产部, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 氦气透平压气机采用间冷回热方式的闭式循环, 因此高低压压气机以及涡轮进排气口处的密封与外层压力壳间就形成了不同压力的腔室, 针对其各不同温度和压力的腔室采用组合弹性环密封。为验证组合弹性环的密封效果, 设计了密封试验器并与机组上的组合弹性环完全一致的密封试验件, 并在密封试验台上分别采用氦气工质和空气工质进行了试验对比。试验结果表明, 组合弹性环具有良好的密封效果, 在低压压气机出口/进口、高压压气机出口/进口以及高压压气机出口/涡轮出口 3 处密封的泄漏分别占设计流量的 0.0322%、0.1035%、0.1282%, 与空气介质相比, 当封前压力为 0.6~1.0 MPa 时, 氦气的泄漏约为空气泄漏的 2 倍, 当封前压力较低时(0.1~0.2 MPa), 氦气与空气的泄漏比较接近。

关 键 词: 氦气透平压气机; 弹性环密封; 高温气冷堆; 氦气/空气工质; 泄漏量

中图分类号: TK479 文献标识码: A

引 言

氦气透平压气机组(以下简称氦气轮机)是高温气冷实验堆 HTR-10GT 能量转换的核心设备。由于

氦气轮机采用间冷回热方式的闭式循环, 因此高低压压气机以及涡轮的进排气口处的密封与外层压力壳间就形成了不同压力和温度的腔室, 图 1 为氦气轮机上组合弹性环密封分布图。为保证闭式循环系统的效率, 要求不同压力腔室间的氦气泄漏尽可能低, 同时结构可靠并便于安装。根据氦气轮机的总体结构设计, 不同压力腔室间的密封决定采用组合弹性环密封^[1-3]。

组合弹性环密封是一种广泛应用于汽车发动机汽缸的一种密封形式, 是一种动态密封, 而氦气轮机上采用的组合弹性环密封是一种静态密封, 应用于静态使用的组合弹性环密封效果如何有待于通过试验验证; 此外, 氦气是一种小分子量的惰性气体, 具有典型的易泄漏特征, 然而易泄漏到什么程度是工程上极为关心的问题, 表 1 是氦气和空气主要物性参数对比。目前, 关于用氦气作为工质进行密封泄漏试验方面的资料很少, 通过试验得到的密封泄漏数据对氦气轮机闭式循环系统的设计和计算具有重要指导意义。

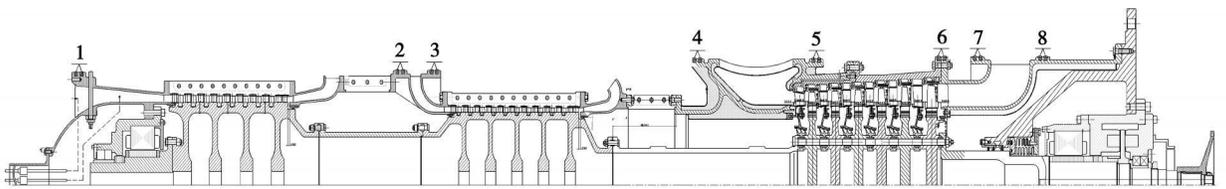


图 1 氦气轮机组弹性环密封分布示意图

1 组合弹性环密封原理

弹性环装入机匣的凹槽时, 由于弹性环本身所具有的弹性力, 使得弹性环的外圆面与压力壳内壁接触, 形成一次接触; 当施加系统的压力后, 弹性环沿轴向被推压, 并与机匣凹槽的侧面形成二次接触,

同时由于密封介质的压力作用, 还增加了一次接触的压力^[4-5], 图 2 为弹性环密封原理图。从弹性环的结构和密封原理来看, 弹性环密封存在 3 个可能的泄漏通道: (1) 经弹性环开口间隙的泄漏。为了获得弹性力, 弹性环必须做成开口式, 而且还要留有一定的热膨胀间隙, 因此, 沿切口的泄漏不可避免; (2) 沿弹性环与凹槽相接触的侧面泄漏。这主要是

收稿日期: 2009-01-23; 修订日期: 2009-09-07

基金项目: 国家 863 重点基金资助项目(2001AA511010)

作者简介: 王 旭(1963-), 男, 辽宁法库人, 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所研究员。

由于加工精度和二次接触的压力不够大造成的泄漏；(3) 沿弹性环与压力壳内壁周向接触的外圆面泄漏。这也主要是由于加工精度和一次接触的压力不够大造成的泄漏。

表 1 氦气和空气主要物性参数对比(20 °C、1 标准大气压)

	氦气	空气
分子量	4.003	28.97
气体常数/ $J(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$	2077	287
定压比热/ $J(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	5193	1004
绝热指数	1.667	1.4
密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0.166	1.204
动力粘度/ $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$	1.98×10^{-5}	1.82×10^{-5}
运动粘度/ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1.19277×10^{-4}	1.5116×10^{-5}
音速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1007	343
导热率/ $\text{W}(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	0.1466	0.0265

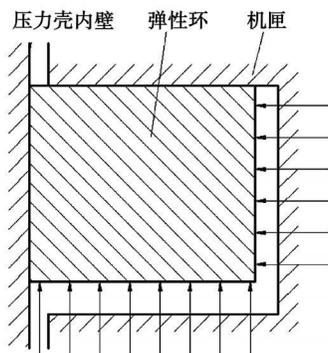


图 2 活塞环密封原理图

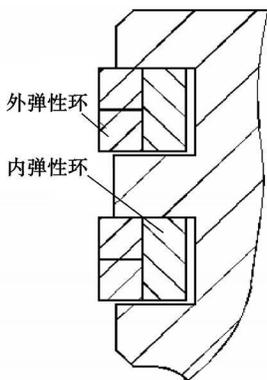


图 3 组合弹性环密封示意图

为尽可能减少弹性环密封的泄漏，氦气轮机的 8 处静子密封均采用组合弹性环密封，并采用二级密封方式。每级密封单元由两个相同的外环和一个内环组成。两个外环的切口互相错位 180°，这样可

有效防止沿切口的泄漏；内环的作用是增加组合弹性环的弹性力，增大外环与壳体内壁的接触压力，从而减小沿壳体内壁的周向泄漏；工作氦气沿轴向使弹性环的轴向工作面贴紧环型槽的侧面，同时工作氦气进入内环的膨胀腔，进一步增大了外环与壳体内壁的一次接触压力，从而限制了沿径向和轴向的泄漏，图 3 为组合弹性环静子密封示意图。

2 密封试验器和试验件

为了准确模拟氦气轮机组弹性环密封的实际密封严效果，采用实尺寸的弹性环密封进行试验验证。由于 8 处密封的基本单元都相同，只是密封直径和密封压差不同，考虑到 8 处密封的密封直径相差并不大，因此，取其中的 1 处进行试验，其余各处的密封可根据其实际进口压力和压差进行试验，然后再按照其直径换算对应泄漏流量。试验模拟的是低压压气机出口与高压压气机进口处的密封，密封直径为 $\Phi 590\text{ mm}$ 。定子密封试验器主要由进/排气侧密封盖、内壳体、外壳体和密封隔板等部件组成，由于密封气体的最高压力达到 1.6 MPa，考虑到强度因素并通过计算，试验器设计成球型结构，图 4 为密封试验器结构图。

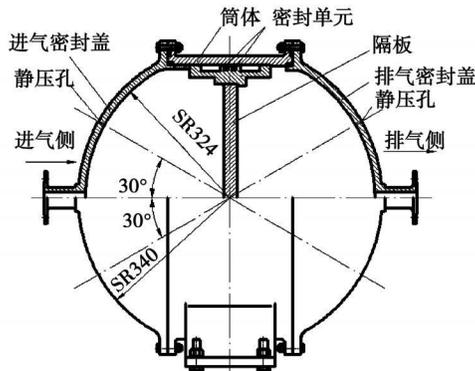


图 4 密封试验器

3 试验方案

3.1 密封试验台系统



图 5 密封试验台

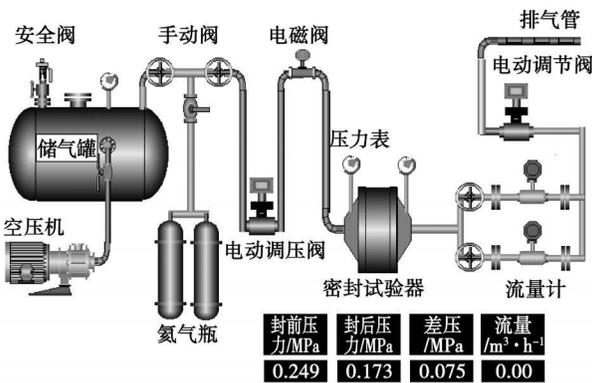


图 6 二次开发得到的数据采集软件工作界面

弹性环密封试验系统由供气系统、控制系统、测量系统和数采系统组成。图 5 为用于组合弹性环密封试验的密封试验台。空气供气系统由一台 12.5 kg/cm^2 压力的柱塞泵、 1.6 m^3 的稳压罐、供气管路、以及供气管路上的阀门等组成。氦气供气系统是用两个并联的高压氦气瓶联接到公共供气管路上, 通过切换可实现各自气源的单独供气; 控制系统主要是完成对电器设备的启动和停止, 这些电器设备包括柱塞泵、电机、供/回油泵、变频器、电磁阀和压力调节阀等。其中电动压力调节阀通过预先设定可实现密封前后的压力要求; 测量系统包括压力测量和流量测量。压力测量主要是通过压力传感器, 流量测量用能电传的涡轮流量计, 小流量情况下采用 $5 \sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$ 的小量程流量计, 大流量情况下采用 $10 \sim 240 \text{ m}^3/\text{h}$ 的大量程流量计; 数据采集系统的硬件主要包括工控机、通讯转换模块、数据采集模块和直流稳压电源等, 软件包括 WINDOWS 操作系统、组态

软件以及利用组态软件自行开发的组态工程采集软件, 可实现对试验数据的实时显示和存储。如图 6 为自行开发的数据采集软件工作界面。

3.2 泄漏测量方法

由于氦气轮机的 8 处弹性环密封前后条件相差很大, 当封前压力低、密封压差较小时, 即使用小量程流量计测量也很可能存在测量不准或误差较大的问题。因此, 采用等容积法通过测量压力并经换算得到密封泄漏的流量, 流量计测量得到的数据只作为参考。

等容积法测量流量基本原理: 一个容积固定的容器(没有质量流入), 在某一压力下, 容器内气体的质量是一定的。当有泄漏发生时, 由于容器的体积是不变的, 经过 t 秒后, 容器内的压力由 P_1 降为 P_2 , 这时容器内的质量由 m_1 减少为 m_2 , 质量流量为 $(m_1 - m_2)/t$, 根据气体的状态方程, 可分别算出两种情况下容器内气体的质量, 因此, 质量流量可求。为能进行相同密封条件下泄漏特性的对比, 用体积流量来表示密封泄漏就更有可比性。根据气体的密度, 进而可算出密封气体在指定条件下的体积流量, 计算式为:

$$t=0 \text{ 时}, P_1 V = m_1 R_g T \quad (1)$$

$$t=t \text{ 时}, P_2 V = m_2 R_g T \quad (2)$$

则:

$$m_1 = P_1 V / R_g T \quad (3)$$

$$m_2 = P_2 V / R_g T \quad (4)$$

$$m = \frac{m_1 - m_2}{t} = \frac{(P_1 - P_2) V}{R_g T t} \quad (5)$$

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho} \times 3600 \quad (6)$$

式中: $P_1 - t=0$ 时容器内气体的压力, Pa; $P_2 - t=t$ 时容器内气体的压力, Pa; V —容器的容积, m^3 ; $m_1 - t=0$ 时容器内气体的质量, kg; $m_2 - t=t$ 时容器内气体的质量, kg; \dot{m} —质量流量, kg/s ; V —体积流量, m^3/h ; R_g —气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T —容器内气体的温度, K。

为保证测量精度, 时间 t 不能太长, 否则, 不能准确反映指定封前压力条件下的泄漏; 时间 t 不能太短, 否则, 压力变化太小, 可能会存在测量误差。实测中, 设定每 0.5 s 进行一次数据采集, 当封前压力较高时, 测量时间分别取 $4, 8$ 和 12 s , 取 3 次测量结果的平均值; 当封前压力较低时, 测量时间分别取 $4, 6$ 和 8 s , 取 3 次测量结果的平均值。另外, 测量时间的开始与停止, 完全由电信号控制。试验中使用的流量计测量精度为 1% , 压力传感器精度为 \pm

0.2%，差压变送器的测量精度为±0.1%。

3.3 试验内容

(1) 空气与氦气对比试验。给定一系列封前压力，封后压力取大气压，分别测量氦气与空气在相同条件下的密封泄漏。

(2) 模拟氦气轮机条件试验。表 2 为氦气轮机弹性环密封进出口压力条件，由于现有密封试验台不具备温度模拟条件，故只模拟进出口压力，不模拟温度，按表 2 的试验条件测量氦气的密封泄漏。

表 2 氦气轮机弹性环密封主要参数

泄漏进出口截面	密封直径 /mm	进/出口压力 /MPa	压差 /MPa
低压出口与低压进口	580	1.018/0.653	0.365
低压出口与高压进口	590	1.018/1.0	0.018
高压出口与高压进口	590	1.567/1.0	0.567
高压出口与涡轮进口	650	1.567/1.506	0.061
高压出口与涡轮出口	660	1.567/0.677	0.89

4 试验结果

4.1 空气与氦气对比试验结果

表 3 和表 4 分别为不同封前压力下氦气和空气的密封泄漏测量结果。实际测试中，由于电动压力调节阀很难做到按给定的压力进行精确控制，因此，表 3 和表 4 中分别按名义封前压力和实际封前压力给出。

表 3 不同封前压力条件下氦气泄漏的测量结果

名义封前压力/MPa	实际封前压力/MPa	容积法/ $m^3 \cdot h^{-1}$			
		1	2	3	平均
1.53	1.530 1	19.436 7	18.549 9	17.711 7	18.566
1.0	0.993 4	9.378 2	9.159 5	8.527 8	9.021 8
0.8	0.793 9	6.559 9	6.231 9	5.944 4	6.245 4
0.6	0.596 1	4.033 1	3.850 9	3.693 0	3.859 0
0.4	0.399 4	1.652 1	1.882 9	1.959 9	1.831 6
0.3	0.299 8	1.312 0	1.202 6	1.150 0	1.221 5
0.2	0.201 6	0.801 8	0.789 6	0.761 3	0.784 2
0.133 6	0.133 6	0.194 4	0.206 5	0.200 5	0.200 5

从表 3 和表 4 的测量结果中可以看出，当封前压力较低时，例如，0.1~0.2 MPa，氦气的泄漏与空

气的泄漏相当，但随封前压力的提高，氦气的泄漏明显增加，当封前压力为 0.6~1.0 MPa 时，氦气的泄漏约为空气泄漏的 2 倍。

表 4 不同封前压力条件下空气泄漏的测量结果

名义封前压力/MPa	实际封前压力/MPa	容积法/ $m^3 \cdot h^{-1}$			
		1	2	3	平均
1.0	0.996 5	4.532 0	4.446 8	4.370 1	4.449 6
0.8	0.796 6	3.320 0	3.247 3	3.166 5	3.244 6
0.6	0.597 8	2.181 0	2.144 7	2.084 1	2.136 6
0.4	0.398 8	1.260 1	1.248 0	1.195 5	1.234 5
0.3	0.299 8	0.727 0	0.787 6	0.751 2	0.755 3
0.2	0.199 9	0.557 4	0.557 4	0.573 5	0.562 8
0.1	0.100 2	0.218 1	0.193 9	0.218 1	0.210 0

氦气的易泄漏特点不难从分子运动论的一些基本理论得到解释，根据麦克斯韦气体分子速率分布律导出的结论，气体分子的速率（最可几速率、平均速率或方均根速率）与温度的平方根和分子质量（或摩尔质量）的平方根成正比^[6]。由于氦气分子的质量（或摩尔质量）很小，在相同的温度和压力下，氦气分子就会获得较高的平均速度，这就是氦气分子易穿透和易泄漏的本质。然而，当封前压力较低时（0.1~0.2 MPa），密封的压比很低，接近临界压比，这时密封出口端接近阻塞状态，因此，在较低的封前压力条件下，空气和氦气的泄漏比较接近。

4.2 模拟氦气轮机工作条件试验结果

表 5 为模拟氦气轮机工作条件密封泄漏测量结果。在实际试验测试中，由于低压进口与高压进口以及高压出口与涡轮进口的压差太小，电动调节阀很难对其进行控制，故无法完成这两项试验测试。氦气轮机的设计点流量为 4.7 kg/s，合算成标况下的体积流量为 101 927.7 m^3/h ，3 处密封泄漏分别占总流量的 0.032‰、0.1035‰、0.1282‰。从试验的测量结果可以看出，组合弹性环密封具有非常好的封严效果，完全能满足氦气轮机闭式循环对总体性能的要求。但也应看到，所提到的测量结果是常温下得到的，实际上，低/高压气机出口以及涡轮进口的温度分别为 108 和 750 $^{\circ}C$ ，高温条件下的泄漏肯定会增加，但变化会有多大，限于现有密封试验台的条件，未能考虑温度对密封泄漏的影响。

表5 模拟氦气轮机工作条件密封泄漏测量结果

密封部位	名义压力/MPa		实际压力/MPa		泄漏/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$		
	封前	封后	封前	封后	1	2	平均
低压出口/低压进口	1.018	0.653	1.018 8	0.693 6	3.304 2	3.267 8	3.286 0
高压出口/高压进口	1.567	1.0	1.567 4	0.967 1	10.835 9	10.265 0	10.550 5
高压出口/涡轮出口	1.567	0.677	1.566 4	0.655 7	13.241 3	12.901 1	13.071 2

5 结 论

(1) 试验表明,组合活塞环密封具有良好的密封效果。在氦气轮机的低压压气机出口/低压压气机进口、高压压气机出口/高压压气机进口以及高压压气机出口/涡轮出口3处密封的泄漏分别占设计流量的0.0322%、0.1035%、0.1282%。

(2) 氦气的密封泄漏明显大于空气的泄漏,封前压力越高,氦气的泄漏越明显,当封前压力为0.6~1.0 MPa时,氦气的泄漏约为空气泄漏的2倍;当封前压力较低时(0.1~0.2 MPa),氦气与空气的泄漏比较接近。

(3) 模拟氦气轮机工作条件下组合弹性环密封氦气泄漏的测量结果,可作为机组性能和氦气输运

系统设计的依据。

参考文献:

- [1] 陈莹. 闭式循环氦气压气机气动设计方法的研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2007.
- [2] 朱荣凯, 张健, 邹积国, 等. 轴流压气机氦气和空气工质相似问题研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(6): 595-600.
- [3] MUTO Y. Design study of helium turbine for the 300 MW HTGR-GT power plant //The International Gas Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition[C]. Munich, 2000. 8-11.
- [4] 彭宝成, 朱玉峰. 弹力环对活塞环密封及寿命影响的研究[J]. 润滑与密封, 2006(8): 97-98.
- [5] 王树青, 吴国栋. 活塞环动力学数值模拟计算及试验研究[J]. 内燃机与动力装置, 2008(1): 14-19.
- [6] 李椿, 章立源, 钱尚武. 热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

(编辑 何静芳)

(上接第806页)

计出与风力发电机的电机、叶片相互匹配的控制策略。本控制器设计了比较完善的保护功能: 可以承受电池反接保护; 过充电保护、过放电保护; 风机过功率保护。

(3) 对所设计的300 W/24 V峰前匹配风力发电系统的风洞测试结果表明: 在高速风段, 对匹配在峰前的风力发电机进行减小负载电阻值的功率控制, 可以安全地将其功率控制在额定值附近。

参考文献:

- [1] 陈云程, 叶枝全, 朱程明. 风力机设计及应用[M]. 上海: 上海科技出版社, 1994.
- [2] MILLER A, MULJADI E, ZINGER D S. A variable speed wind turbine power control[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions, 1997, 12(2): 181-186.

(编辑 何静芳)

the ammonia/nitrogen ratio is bigger than 1.0, the growth margin of the NO_x removal rate will decrease with an increase of the above ratio, but the growth margin of the ammonia leakage rate will increase. The temperature window and the NO_x removal rate obtained from the simulation by using software Chemkin 4.1 are basically in agreement with the test results. Through a detailed analysis of the important elements of the mechanism, the main reaction routes at various temperatures were identified. **Key words:** selective non-catalytic reduction (SNCR) denitrification, mixing, gas-state ammonia, simulation conducted by using Chemkin

小型风力发电机组优化控制策略与实验研究= **Optimized Control Tactics and Experimental Study of Small-sized Wind Power Generator Units**[刊, 汉]/BAO Dao-ri-na, LIU Zhi-zhang, TIAN Rui (College of Energy Source and Power Engineering, Inner Mongolia Polytechnic University, Huhhot, China, Post Code: 010051), ZHANG Wan-xiang (Baoding Tianwei Wind Power Science and Technology Co. Ltd., Baoding, China, Post Code: 071051)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 803 ~ 806, 811

Presented were tactics for optimizing and controlling the power of a small-sized wind turbine generator unit. In the light of a 300 W/24 V permanent magnetic power generator being chosen and by using Wilson blades, a calculation model was devised, and blades for 300 W wind turbines were designed by using MATLAB language. From the phenomenon that the design of a controller is isolated and separated from the matching characteristics of blades and generators in the existing control systems for wind turbines, designed was a controller to mutually match the generator and blades of the wind turbine generator. During the wind tunnel tests, the variation law of the prototype power output with the system voltage was tested under the condition of a constant wind speed of 8, 10, 12 and 15 m/s etc., respectively. When the system voltage decreases, the wind turbine power output will all along decrease. In this process, no phenomenon of power output increase emerges. This is fully verified by the wind turbine generator operating in the pre-peak zone. When the wind speed is greater than the rated one, the control system can control the power output of the wind turbine generator by reducing the resistance value of the load of the connect-in system. The foregoing may offer definite guidance and is of practical value for studying the controllability, reliability and durability of a small-sized wind power generation system. **Key words:** wind turbine generator, blade design, unit power, PWM (pulse width modulation) power controller

氦气透平压气机组合弹性环密封试验研究= **Experimental Study of a Combined Elastic Ring Seal in a Helium Turbine Compressor**[刊, 汉]/WANG Xu, XU Li-hua, ZHONG A-xia (CSIC Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036), SHAN Shi-kui (Production Department, Harbin Electric Machinery Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(6). — 807 ~ 811

As an intercooling recuperator (ICR) closed cycle is adopted for a helium turbine compressor, a variety of chambers with different pressures are formed between the seals at the HP/LP compressor and at the turbine inlet/outlet on one side and the outer-layer pressure shell on the other. A kind of combination elastic ring seal is adopted in various chambers at different temperatures and pressures. To verify the sealing effectiveness of the combination elastic rings, a seal test rig and test pieces fully identical to the combination elastic rings used in the turbine unit were designed. Moreover, on the seal test stand, a contrast experiment was performed by using helium and air working medium respectively. The test results show that the combination elastic rings have a good sealing effectiveness. The leakage rates from the seals at three locations, namely, LP compressor outlet/inlet, HP compressor outlet/inlet and HP compressor outlet/turbine outlet, account for 0.0322%, 0.1035% and 0.1282% of the design flow rate respectively. When the pressure before the seal ranges from 0.6 to 1.0 MPa, the leakage rate of helium is about 2 times that of air as compared with the air medium. When the pressure before the seal is relatively low (0.1 to 0.2 MPa), the leakage rate of helium is comparatively close to that of air. **Key words:** helium turbine compressor, elastic ring seal, high temperature gas-cooled reactor, helium/air working medium, leakage rate