

10MW 高温气冷堆氦气透平循环的泄漏特性分析^①

蒋慧静^② 杨小勇 丁 铭 王 捷^③

(清华大学核能与新能源技术研究院,先进反应堆工程与安全教育部重点实验室 北京 100084)

摘 要 为了分析高温气冷堆氦气透平循环中的气体泄漏对循环特性和循环部件的影响,通过理论推导建立了考虑泄漏情况的闭式布雷登循环的数学模型,并对不同泄漏模型进行了分析比较。分析表明,闭式布雷登循环的泄漏主要发生在高压压气机出口到透平入口处。而且,泄漏的发生改变了循环系统的质量流量和系统压力分布,使循环效率降低。以 10MW 高温气冷堆闭式氦气透平循环发电系统(HTR_10GT)为例,充装量调节时,实际泄漏模型下的泄漏量高于定泄漏系数模型,因此循环效率稍低于定泄漏系数模型。与不考虑泄漏时相比较,循环效率有 2% 左右幅度的降低;循环的总压比下降 1% 左右;而且压气机的压比和透平的膨胀比分别有 0.5% 和 1% 幅度的降低。

关键词 高温气冷堆, 氦气透平循环, 泄漏, 循环效率

0 引言

高温气冷堆以氦气为冷却工质,石墨为慢化剂,具有固有安全性的优势,而且耐高温的全陶瓷型堆芯结构使反应堆堆芯出口温度可以高达 950℃^[1]。与布雷登循环的联合使得高温氦气得到充分利用。目前,国内外已对高温气冷堆氦气透平联合循环做了一些理论研究。清华大学核能与新能源技术研究院(INET)研发的 10MW 模块式球床高温气冷堆(HTR-10)于 2000 年 12 月达到临界^[2],2003 年 1 月满功率运行,验证了模块式球床高温气冷堆的固有安全性。在此基础上,INET 开始高温气冷堆闭式氦气透平循环发电计划,即 HTR-10GT,来验证高温气冷堆氦气透平循环技术的可行性。闭式直接氦气透平循环因与高温气冷堆的结合能充分利用高温气冷堆较高的出口温度而具有较高的循环效率。但氦气透平循环中部件间密封的存在导致气体泄漏,之前对布雷登循环的研究或者不考虑泄漏^[3],或者将泄

漏系数固定^[4],不能充分反映实际工程中泄漏过程的发生对循环特性和循环部件的影响,因而本文建立了实际泄漏模型,对泄漏问题进行了分析讨论。

1 计算模型

1.1 闭式布雷登循环的数学模型

本文采用单轴布置、中冷、回热的高温气冷堆闭式布雷登循环作为研究对象,其流程如图 1 所示。循环中的主要部件有反应堆、做功部件(透平、压气机)及换热部件(回热器、预冷器以及间冷器)。氦气在各个部件中对应的热力过程如表 1 所示。

高温气冷堆堆芯是一个复杂的对象,涉及到氦气的传热和流动过程,以及中子在堆芯中的运输过程。本文采用德国于利希研究中心开发的球床式高温气冷堆热工瞬态系统分析软件 THERMIX 对堆芯进行计算分析^[5]。将氦气在堆芯入口、出口处的温度、压力、质量流量三个参数与功率转换单元的计算模型进行数据传递。

① 国家重大专项科技专项(2011ZX06901-019)资助项目。

② 女,1989 年生,博士生;研究方向:高温气冷堆氦气透平循环,反应堆热工水力;E-mail: hui8813@163.com

③ 通讯作者,E-mail: hui8813@163.com

(收稿日期:2015-02-12)

功率转换单元主要由做功部件(压气机、透平)、换热器(预冷器、间冷器、回热器)及其连接的管路组成。在这些部件中,所有的物理过程可以用一维可压缩模型来描述,其基本控制方程如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{G}{S} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_p G T}{\rho S} \right) = \dot{q} + \frac{DP}{Dt} + C_f \frac{G^3}{2D_h \rho^2 S^3} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{G}{S} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{G^2}{\rho S^2} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x} - C_f \frac{G^2}{2D_h \rho S^2} \quad (3)$$

式中: ρ 为气体密度, kg/m^3 ; x 为流向坐标, m ; t 为时间, s ; G 为气体的质量流量, kg/s ; S 为流道横截面积, m^2 ; P 为气体压力, Pa ; C_f 为流体阻力系数; T 为气体温度; C_p 为气体定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; D_h 为流道水力直径, m ; \dot{q} 为热源, W/m^3 。

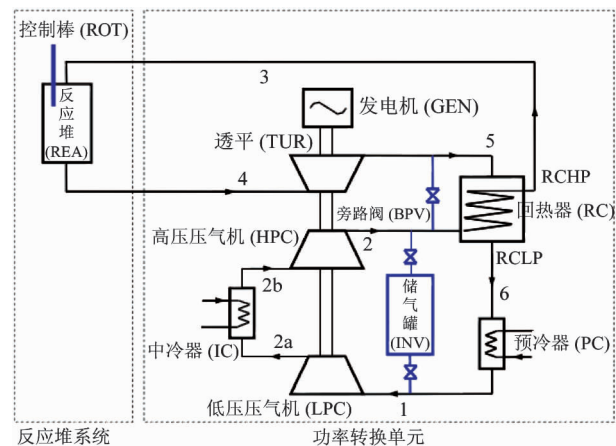


图1 闭式布雷登循环的流程示意图

表1 布雷登循环中氦气的热力过程

位置	部件	氦气热力过程
1-2a	低压压气机	绝热压缩
2a-2b	间冷器	冷却
2b-2	高压压气机	绝热压缩
2-3	回热器(高压侧)	吸热
3-4	反应堆堆芯	吸热
4-5	透平	绝热膨胀做功
5-6	回热器(低压侧)	放热
6-1	预冷器	冷却

对于连接循环中各个部件的管路部分,可以通过以下假设进一步简化其计算模型:稳态;绝热;忽略能量方程中的耗散项和表面力做功项。在不考虑泄漏的情况下,方程(1)~(3)可简化式如下:

$$G_{\text{in}} = G_{\text{out}} \quad (4)$$

$$P_{\text{out}} = \xi P_{\text{in}} \quad (5)$$

$$T_{\text{out}} = T_{\text{in}} \quad (6)$$

1.2 循环效率

在压气机内压缩、透平内膨胀的过程中,氦气与外界的热量交换很小,可视为绝热过程。因此,氦气在透平、低压压气机、高压压气机内的功率如下式所示:

$$\begin{aligned} W_{\text{TUR}} &= G_{\text{TUR}} C_p (T_4 - T_5) \\ &= G_{\text{TUR}} C_p T_4 \eta_{\text{TUR}} (1 - \pi^{-\varphi}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{LPC}} &= G_{\text{LPC}} C_p (T_{2a} - T_1) \\ &= G_{\text{LPC}} C_p (\gamma_{\text{LPC}}^{\varphi} - 1) / \eta_{\text{LPC}} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} W_{\text{HPC}} &= G_{\text{HPC}} C_p (T_2 - T_{2b}) \\ &= G_{\text{HPC}} C_p (\gamma_{\text{HPC}}^{\varphi} - 1) / \eta_{\text{HPC}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, G_{TUR} 、 G_{LPC} 、 G_{HPC} 分别为流过透平、低压压气机、高压压气机的质量流量; η_{TUR} 、 η_{LPC} 、 η_{HPC} 分别为透平、低压压气机、高压压气机的绝热效率; π 为透平的膨胀比; γ_{LPC} 、 γ_{HPC} 分别为低压压气机、高压压气机的压缩比; C_p 为氦气的定压比热; φ 为绝热因子, $\varphi = (k - 1)/k$ 。氦气在 $0.1 \sim 10\text{MPa}$, $0 \sim 1000^\circ\text{C}$ 的范围内,定压比热 C_p 和等熵指数 k 可视为常数,分别取为 $5195\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 1.667 。

布雷登循环的输出功为透平膨胀功率减去低压压气机与高压气机的压缩功,表达式为

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= W_{\text{TUR}} - W_{\text{LPC}} - W_{\text{HPC}} \\ &= G_{\text{TUR}} C_p T_4 \eta_{\text{TUR}} (1 - \pi^{-\varphi}) - G_{\text{LPC}} C_p (\gamma_{\text{LPC}}^{\varphi} - 1) / \eta_{\text{LPC}} - G_{\text{HPC}} C_p (\gamma_{\text{HPC}}^{\varphi} - 1) / \eta_{\text{HPC}} \end{aligned} \quad (10)$$

高温气冷堆布雷登循环的热源为反应堆,则循环中吸收的热量即为氦气流经反应堆堆芯时的吸热量,如下式所示:

$$Q_{\text{in}} = G_{\text{core}} C_p (T_4 - T_3) \quad (11)$$

式中, G_{core} 为氦气流经堆芯的质量流量。

布雷登循环的效率为输出功率与吸收热量的比值,则效率的表达式如式(12)所示:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}} = [G_{TUR} C_P T_4 \eta_{TUR} (1 - \pi^{-\varphi}) - G_{LPC} C_P (\gamma_{LPC}^{\varphi} - 1) / \eta_{LPC} - G_{HPC} C_P (\gamma_{HPC}^{\varphi} - 1) / \eta_{HPC}] / [G_{core} C_P (T_4 - T_3)] \quad (12)$$

通过对循环效率的公式分析,可以得到循环主要受以下因素的影响^[3]:循环的压比、温比、各部件的效率、压损率的影响。

1.3 泄漏的数学模型

泄漏的产生需要压差和密封间隙两个必要条件^[6]。根据密封性质,可以分为静密封和动密封。固定部件的密封间隙产生的密封为静密封,透平压气机转子和支撑结构之间的密封为动密封。如图2所示,在高温气冷堆闭式氦气透平循环中,泄漏主要发生在以下6个位置^[7]:高压压气机出口至透平出口;高压压气机出口至透平入口;反应堆入口至透平入口;高压压气机出口至高压压气机入口;低压压气机出口至高压压气机入口;低压压气机出口至低压压气机入口。

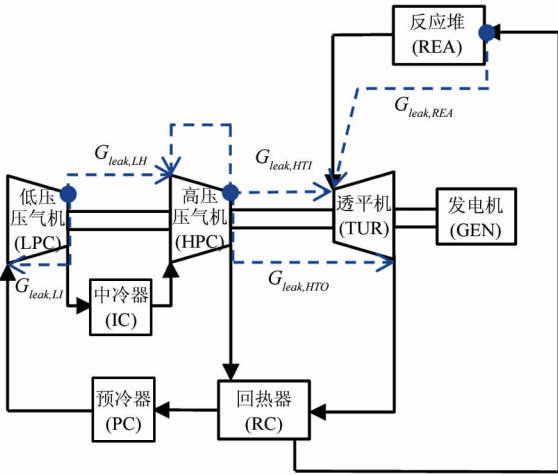


图2 闭式布雷登循环泄漏位置图

对于静密封处的泄漏,亚音速流动($Ma \leq 0.3$)时泄漏量的计算公式为

$$G = \mu F \sqrt{2\rho(P_1 - P_2)} \quad (13)$$

式中, μ 为泄漏系数, F 为密封处流动面积。

当 $Ma > 0.3$ 时,泄漏量的计算公式为

$$G = \mu F \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_1 \rho_1 (\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k})} \quad (14)$$

式中, k 为绝热因子, P_1 为密封前压力, ρ_1 为密封前密度, $\beta = P_2/P_1$, P_2 为密封后压力。密封前后的压力即为泄漏发生处的两侧压力值。

对于动密封,泄漏量采用Stodola公式^[8]进行计算,如下式所示:

$$G = \mu F \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2)}{ZRT_1}} \quad (15)$$

式中, μ 为泄漏系数, F 为密封处流动面积, Z 为密封齿数, T_1 为密封前温度, R 为气体常数。

考虑泄漏时,假设泄漏过程的发生不改变气流的温度、压力,只是质量流量的变化,那么各个连接管路控制方程(5)、(6)不变,7个管路的连续性方程(4)变为

$$G_{LPC} = G_{PC} + G_{leak,LL} \quad (16)$$

$$G_{IC} = G_{LPC} - G_{leak,LH} - G_{leak,LL} \quad (17)$$

$$G_{HPC} = G_{IC} + G_{leak,LH} + G_{leak,HH} \quad (18)$$

$$G_{RC,HP} = G_{HPC} - G_{leak,HTO} - G_{leak,HTI} - G_{leak,HH} \quad (19)$$

$$G_{CORE} = G_{RC,HP} - G_{leak,REAT} \quad (20)$$

$$G_{TUR} = G_{CORE} + G_{leak,HTI} + G_{leak,REAT} \quad (21)$$

$$G_{RC,LP} = G_{HPC} + G_{leak,HTO} \quad (22)$$

2 结果及分析

2.1 循环的泄漏特性

额定工况下,反应堆堆芯的质量流量为4.55kg/s,循环回路中总的泄漏量为0.195kg/s,约占闭式布雷登循环质量流量的4.3%。图3为额定工况下不同泄漏位置的泄漏量占总泄漏量的比例,由图可以看出,高压压气机出口到透平入口处泄漏量最大,将占总泄漏量的一半,这是由于该处密封为动

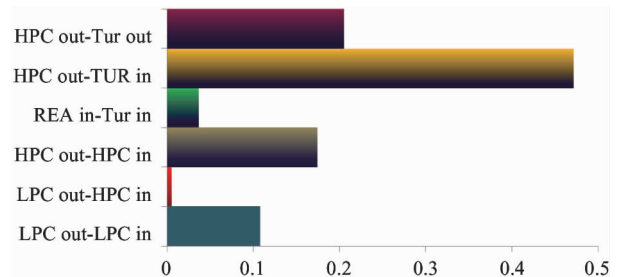


图3 不同泄漏位置泄漏量占总泄漏量的比例

密封,动密封处的泄漏是因为转子与定子的相对转动,间隙处的流动面积较大,泄漏量较大。泄漏发生最大部件为高压压气机处的泄漏,这是因为高压压气机出口处的压力最大。

泄漏的发生导致循环各部件的局部质量流量发生变化,相对高压处的部件质量流量相比不考虑泄漏的计算值增大;相对低压处的部件质量流量相比不考虑泄漏的计算值减小。如图4所示,考虑泄漏后,在循环中氦气的总质量不变的前提下,质量流量最高的部件为高压压气机,其质量流量约为不考虑泄漏时的1.01倍。质量流量最低的部件为反应堆堆芯,其质量流量为不考虑泄漏时的0.97左右。

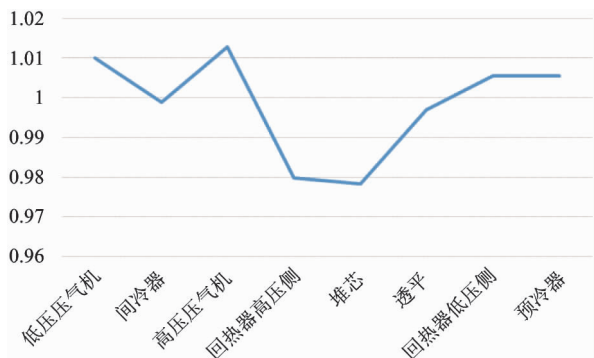


图4 各部件质量流量与不考虑泄漏时的比值

充装量调节是闭式布雷登循环相比于开式布雷登循环一个特有的调节方式,通过改变整个循环系统中氦气的总质量改变氦气密度来调节闭式布雷登循环的质量流量、压力以及温度等参数。图5给出了各泄漏位置处的泄漏量随氦气充装量的变化趋势,可以看出大部分位置的泄漏量随氦气充装量的增加线性增加,这是因为大部分泄漏所在的密封性质为静密封,采用以上式(13)进行计算,其中泄漏系数和流通面积主要取决于密封结构不随质量流量变化,则泄漏量取决于氦气的密度和密封两侧的压力差,而氦气的密度和密封的压差随充装量的增加而线性增大^[9]。而高压压气机出口-透平入口的泄漏包括动密封和静密封处的泄漏,通过图5中该处的泄漏量与相应的线性曲线比较,可以看出实际泄漏模型中的泄漏量与氦气充装量的变化不呈线性关系。

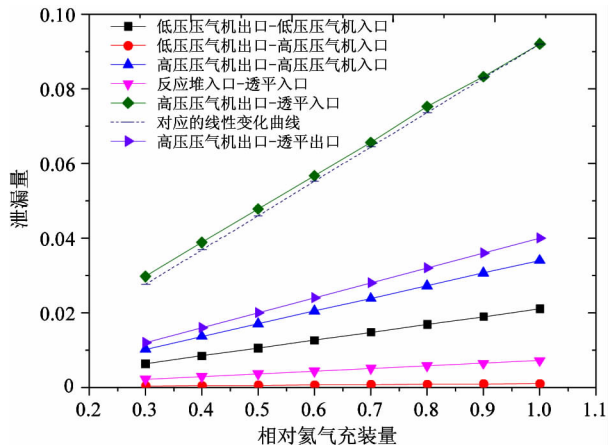
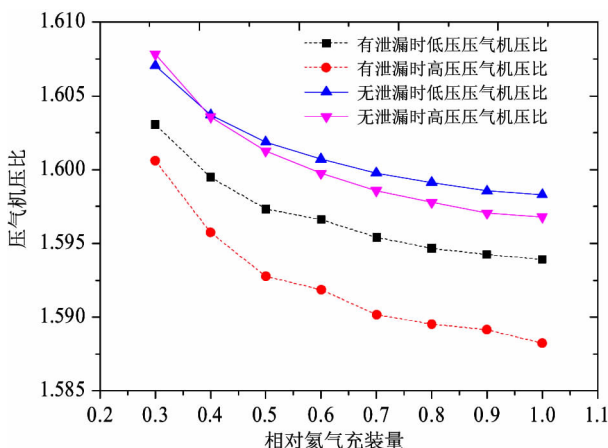


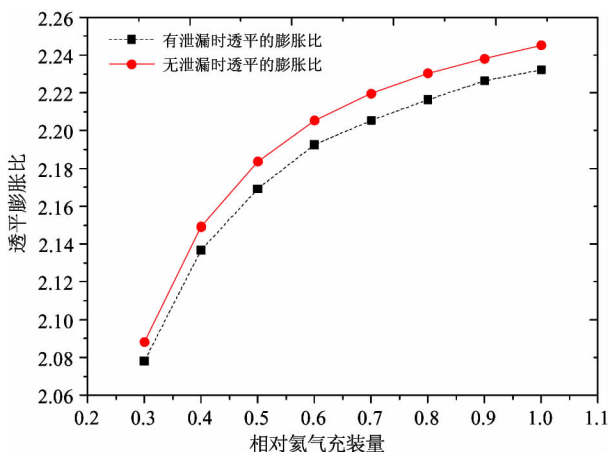
图5 不同位置的泄漏量随充装量变化

2.2 泄漏对关键部件的影响

通过以上泄漏对于闭式布雷登循环压比的影响分析,可以看出泄漏主要影响的部件为透平机械,图6给出了有无泄漏时压气机的压比、透平的膨胀



(a) 有无泄漏时压气机的压比随充装量变化



(b) 有无泄漏时透平的膨胀比随充装量变化

图6 有无泄漏时透平机械的压比随充装量变化

比的比较,可以看出在有泄漏的情况下低压压气机与高压压气机的压比有分别约为0.5%、1%幅度的降低,压气机的效率相应稍微降低。而透平的膨胀比也有1%左右的降低。这是局部质量流量的改变对压力产生影响的结果。

2.3 泄漏对循环参数的影响

图7分别示出了有无泄漏时循环效率随充装量的变化。如图7所示,将实际泄漏模型与不考虑泄漏的结果比较可知,考虑泄漏时循环效率有2%左右幅度的降低,这是因为泄漏的发生导致部件局部质量流量的改变,透平和压气机的工作状态偏离设计工况下的速度三角形,效率发生变化,导致循环效率发生相应变化。循环效率随充装量变化的趋势与不考虑泄漏时基本一致。

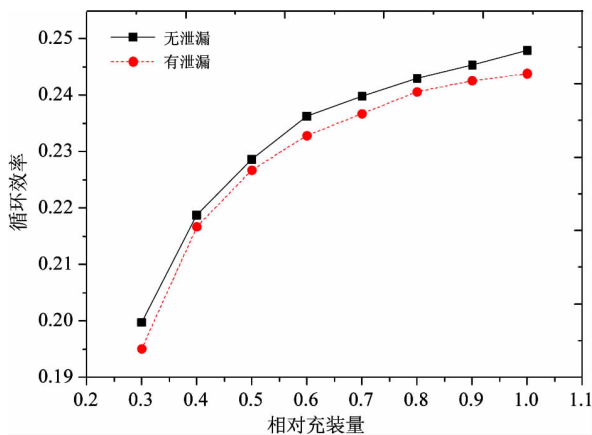


图7 有无泄漏时循环效率随充装量的变化

图8示出了有无泄漏时循环参数比值随充装量的变化。由图8可以看出,在考虑泄漏后布雷登循

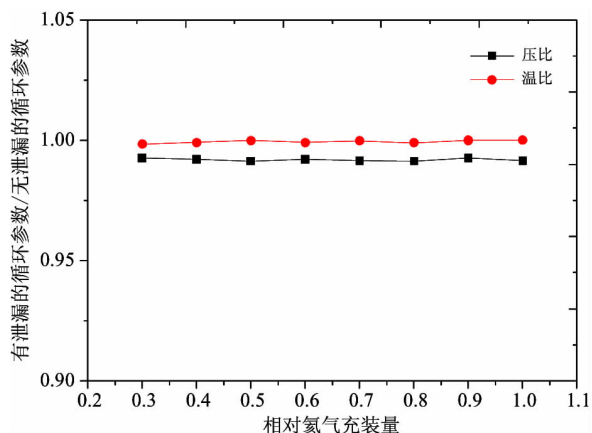


图8 有无泄漏时循环的参数比值随充装量的变化

环的温比有低于0.2%的小幅度降低,影响很小。而泄露对循环压比的影响较为明显,考虑泄漏时循环的压比下降1%左右。这是因为泄漏的产生使得高压处的流体减少,低压处的流体增加,缓和了高压侧与低压侧气体的压差。

3 结论

由于密封结构的存在,泄漏在闭式布雷登循环中是实际发生的。通过理论推导建立了泄漏模型,并利用该模型研究了泄漏对10MW高温气冷堆闭式布雷登循环的影响。得到以下几点结论:

(1) 额定工况下,循环回路中总的泄漏量为约占闭式布雷登循环质量流量的4.3%,其中高压压气机出口到透平入口处泄漏量所占份额最大,在实际工程中要予以重点考虑高压压气机处的密封设计。

(2) 泄漏对闭式布雷登循环的特性参数有影响。考虑泄漏时循环效率有2%幅度的下降,循环的压比下降1%左右。

(3) 泄漏对关键部件的特性也产生了影响。考虑泄漏时低压压气机压比约下降0.5%,高压压气机压比和透平的膨胀比均下降1%左右。

由于压气机、透平的密封在实际工程中无法避免,建议做好密封技术,尽可能地减小密封间隙,降低泄漏量。

参考文献

- [1] Kiryushin A I, Kodochigov N G. Project of GTMHR high-temperature helium reactor with gas turbine. *Nuclear Engineering and Design*, 2005, 173(1-2): 119-129
- [2] Wu Z, Lin D, Zhong D. The design features of the HTR-10. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 218:25-32
- [3] 王捷,顾义华. 高温气冷堆能量转换汽轮机基本特性的研究. *高技术通讯*, 2004, 14(8):84-89
- [4] 丁铭. 高温气冷堆闭式布雷登循环动态特性和控制方法研究:[博士学位论文]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 2009
- [5] 石磊,郑艳华. 球床模块式高温气冷堆失冷事故特性研究. *原子能科学技术*, 2009, 43: 236-239
- [6] 刘后桂著. 密封技术. 长沙:湖南科学技术出版社. 1981

- [7] 于振家. 流动损失对高温气冷堆氦气透平发电系统效率影响的研究:[硕士学位论文]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院,2010
- [8] 朱高涛,刘卫华. 迷宫密封泄漏量计算方法的分析. 润滑与密封,2006, 176(4): 122-126
- [9] Jiang H J, Yang X Y, Ding M. A study on performance characteristics for closed Brayton cycle in inventory regulation, In: Proceedings of the 22th International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic, July, 2014

Leakage characteristics analysis of high temperature gas cooled reactors' helium turbine cycle

Jiang Huijing, Yang Xiaoyong, Ding Ming, Wang Jie

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

To investigate the influence of the gas leakage in a high temperature gas cooled reactor (HTGR) helium turbine cycle on the cycle characteristics and cycle parts, a mathematical model for closed Brayton cycle considering leakage was established by theoretical deduction, and some different leakage models were analyzed and compared. The results show that the most amount of leakage arises between the outlet of the high pressure compressor and the inlet of the turbine, and the leakage changes the cycle system's mass flow rate and pressure distribution, leading to a little decrease of the cycle efficiency. Taking the HTR-10GT (a 10MW HTGR generating system with the helium turbine cycle) as example, the cycle efficiency is lower than the constant leakage coefficient model when inventory decreases in the cycle. The pressure ratio of Brayton cycle, compressor and turbine becomes a little lower when leakage exists.

Key words: high temperature gas cooled reactor, helium turbine cycle, leakage, circulation efficiency