

高温气冷堆氦气透平循环流动阻力特性分析^①

蒋慧静^② 杨小勇^③ 丁 铭 王 捷

(清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘 要 采用更加真实的阻力模型分析了流动阻力对 10MW 高温气冷堆(HTR-10)氦气透平循环特性的影响规律。分析结果表明,高温气冷堆氦气透平循环的压力损失主要由局部阻力和摩擦阻力组成。10MW 高温气冷堆闭式氦气透平循环(HTR-10GT)发电系统在实际充装量调节及额定工况下,氦气在部件连接管道的局部压降占 82.4%,沿程阻力压降占 17.6%。氦气充装量减小时,局部压损系数不变而沿程阻力系数增大,导致循环效率降低;当充装量由 100%降低到 30%,连接管道的局部压降份额下降约 20%,系统效率下降 15%左右。随着充装量的减小,做功部件的进出口压力随充装量的变化线性变化,压气机的压比略有增大,透平的膨胀比有较大幅度的非线性增大。

关键词 高温气冷堆(HTR), 氦气透平循环, 压力损失, 氦气充装量, 循环效率

0 引 言

高温气冷堆(HTR)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℃。20 世纪 80 年代以后,美国麻省理工学院的 Lidsky 发展了氦气透平-模块化反应堆(GT-MHR)^[1],它利用模块式高温气冷堆直接气体透平发电,具有结构紧凑、效率高的特点。20 世纪末,南非选择了德国的球床模块式高温气冷堆加气体透平机组直接循环发电的方案(PBMR)^[2],南非国家电力公司希望以此满足其电力需求。2009 年由于资金问题该项目被无限延期,目前不再从事相关研究。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^[3],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 开始了 10MW 高温气冷堆闭式氦气透平循

环(HTR-10GT)发电计划,来验证高温气冷堆氦气透平循环技术的可行性。高温气冷堆与闭式直接氦气透平循环发电方案的结合使高温气冷堆有较高的热效率。目前对氦气透平循环特性的分析大都采用无管路阻力的理想情况^[4],或者采用定压降比的模型^[4],与实际工况压降相比有一定误差。鉴于这种情况,本研究通过建立更加真实的阻力模型,分析了流动阻力对高温气冷堆氦气透平循环特性的影响规律,并给出了相应的结论。

1 氦气透平循环原理及调节

本文研究的对象是采用单轴布置、中冷、回热的高温气冷堆闭式布雷登循环,图 1 给出了其流程图。在循环系统中,氦气作为循环工质,在高温气冷堆的堆芯内被加热后,进入透平膨胀做功,将热能转化为机械能,然后进入回热器的低压侧与高压侧的氦气进行热量交换,再经过预冷器进一步冷却后,到带有中间冷却器的压气机进行两次压缩,之后进入回热

① 国家重大专项科技专项经费(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,反应堆热工水力等;E-mail: hui8813@163.com

③ 通讯作者,E-mail: wjinet@tsinghua.edu.cn

(收稿日期:2014-12-29)

器的高压侧进行热量交换后流回高温气冷堆堆芯,完成布雷登循环。

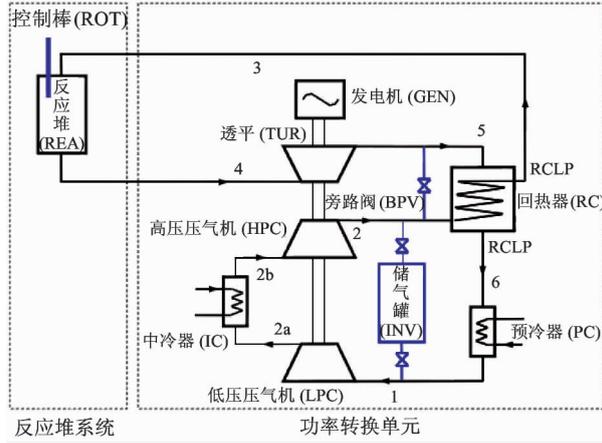


图1 HTR-10GT 的流程图

闭式布雷登循环有三种调节方法:反应堆出口温度调节、充装量调节、旁路阀调节^[5]。其中充装量调节是闭式布雷登循环相对开式循环特有的一种调节方式。体积一定,氦气密度与其充装量呈线性关系。温度不变,气体的压力正比于它的密度,所以闭式循环的压力水平可以由充装量决定。本文主要在反应堆出口温度调节和充装量调节两个变工况下分析循环的阻力特性。建立更加真实的阻力模型,对分析管路的阻力特性及其对循环特性的影响会更有意义。

2 计算模型和计算方法

2.1 闭式布雷登循环的数学模型

闭式布雷登循环包括高温气冷堆和功率转换单元两部分,分别对其建模后进行耦合计算。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输运过程。本研究采用德国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^[6],进行氦气在堆芯入口、出口处的温度、压力、质量流量三个参数与功率转换单元计算模型的数据传递。

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,其基本控制方程有质量守恒方程

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

动量守恒方程

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

能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_p G T}{\rho S} \right) = q''' + C_f \frac{|G| G^2}{2D_h \rho^2 S^3} + \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

其中: 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 ; q''' 为热源, W/m^3 。

对于连接循环中各个部件的管路部分,可以通过假设稳态、绝热、忽略能量方程中的耗散项和表面力做功项来进一步简化其计算模型。这样,方程(1) - (3)可分别简化为

$$G = \text{const} \quad (4)$$

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

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

其中, P_{in} 、 P_{out} 分别为入口压力和出口压力, Pa ; ξ 为压力损失系数; T_{in} 、 T_{out} 分别为入口温度和出口温度, K 。

2.2 阻力计算的数学模型

氦气在布雷登循环中的流动阻力损失可分为4部分:局部压降、摩擦压降、重力压降、加速压降。不考虑工质泄露率的影响,则加速压降可忽略不计。在整个循环回路中,氦气的重力势差非常小,所以重力压降可以忽略。重点考虑摩擦压降与局部压降。摩擦压降产生的原因为流体与管壁间的粘附作用、内摩擦力,其计算公式为

$$\Delta P_L = f_D \frac{L}{d_c} \frac{\rho u^2}{2} \quad (7)$$

其中, f_D 为达西摩擦系数。局部压降是由于弯管、流道突扩或突缩、阀门等几何变化因素所产生,计算

公式为

$$\Delta P_L = \xi \frac{\rho u^2}{2} \quad (8)$$

其中, ξ 为局部阻力系数。计算两种阻力的关键在于摩擦系数与局部阻力系数的确定。表1和表2分别给出了这两种阻力系数的计算方法^[7]。

表1 摩擦系数的经验公式

| | |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------|
| $Re < 2320$ | $f_D = 64/Re$ |
| $2320 < Re < 4000$ | $f_D = 0.0025Re^{1/3}$ |
| $4000 < Re < 10^5$ | $f_D = 0.3164/Re^{0.25}$ |
| $10^5 < Re < 3 \times 10^6$ | $f_D = 0.0032 + 0.221/Re^{0.237}$ |
| $Re > 3 \times 10^6$ | $f_D = 0.11 \left(\frac{\Delta}{d} \right)^{0.25}$ |

注:其中 Re 为雷诺数, Δ/d 为相对粗糙度

表2 几种局部阻力系数计算公式

| | |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 截面突然减小 | $\xi = 0.5(1 - A_2/A_1)$ |
| 截面突然扩大 | $\xi = (1 - A_1/A_2)^2$ |
| 90度弯管 | $\xi = 0.131 + 0.163(d/R)^{3.5}$ |
| 折管 | $\xi = 0.946 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) + 2.05 \sin^4\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ |

注:其中, A_1, A_2 为截面面积, d/R 为弯头, α 为角度

氢气在反应堆内的压降由球床和热气混合结构(由底石墨反射层、热气室和热气导管组成)两部分的压降组成。周杨平等对高温气冷堆热气混合结构进行了热工水力分析^[8],认为热气导管入口处流通面积的急剧缩小产生了很大的阻力,因此主要考虑热气导管入口的局部压降。局部阻力系数只与其几何结构有关,所以在进行充装量调节的分析时可以给定热气混合结构一个阻力系数。

氢气在燃料球床所受摩擦阻力可以运用德国安全法则 KTA3102.3 规定的如下公式

$$\frac{\Delta P}{\Delta H} = f \frac{1-\omega}{\omega^3} \frac{1}{d} \frac{1}{2\rho} \left(\frac{\dot{m}}{A} \right) \quad (9)$$

计算,其中 $f = \frac{320}{(1-\omega)} + \frac{6}{\left(\frac{Re}{1-\omega}\right)^{0.1}}$, $Re =$

$\frac{\left(\frac{\dot{m}}{A}\right) \times d}{\mu}$ 。适用范围: $1 < Re/(1-\omega) < 10^5$; 0.36

$\leq \omega \leq 0.42$; $H > 5d$ 。式中, ΔP 为氢气流过球床高度的摩擦阻力压降, f 为摩擦阻力系数。

参考任啟森对高温气冷的氢气透平循环工质的几种计算模型的分析结果^[9],采用德国安全法则 KTA3102.3 规定的公式计算氢气的热物理性质。

3 结果及其分析

3.1 闭式布雷登循环的阻力特性

闭式布雷登循环中的压降包括氢气在各个循环部件和其连接管道中的压降,此处分别对管路中的压降和主要部件的压降特性进行分析。

图2为氢气在连接管路中的压降随氢气充装量变化的曲线,可以看出管路中局部压降随充装量的增加而线性增加。这是由于充装量变化时局部阻力系数保持不变,而氢气的密度随充装量线性变化,因此由表2知管路的局部压降随充装量线性变化。摩擦压降在充装量由30%至50%额定值变化时,随充装量的增加而减小,当充装量从50%增加到100%时,随充装量的增加而增大。一方面,充装量增加,氢气的密度增大,导致摩擦压降增大;另一方面,随着充装量的增加,雷诺数增大,由表1给出的计算公式可知摩擦系数随之减小,这导致摩擦压降减小,二者的综合影响导致摩擦压降随充装量的变化。由图2曲线的变化趋势可以看出,在氢气充装量较小时(30%~50%额定工况)摩擦系数对摩擦阻力压降的影响起到主导作用;当氢气充装量较大时(大

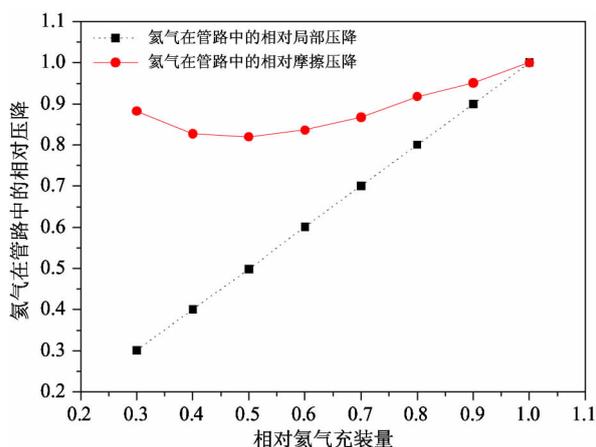


图2 管路内局部压降与氢气充装量的关系

于50%额定值)氦气密度对摩擦阻力压降的影响起到主导作用,尤其是当质量流量增大到一定值(80%~100%额定值),氦气流动接近于湍流的“自模区”(即摩擦系数只与管道的相对粗糙度有关,不再随雷诺数变化),管路内的摩擦压降与充装量近似成线性变化。

图3为管路内的局部压降占总压降比例与充装量的关系,可以看出,局部压降所占比例随充装量的增加而增大,充装量越小时该变化越明显。这是因为在30%~50%额定值时,随充装量的增加局部压降和摩擦压降分别增加和减少,导致局部压降的比例有明显的增大。

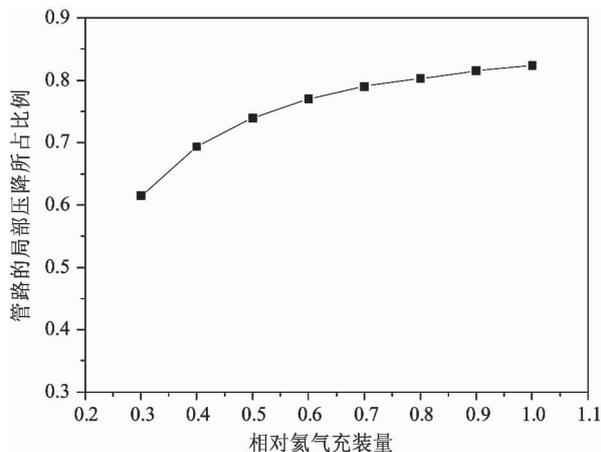


图3 管路内局部压降所占比例与氦气充装量的关系

图4和图5分别为充装量调节下氦气在反应堆内的压降和氦气在热气混合结构内的压降所占比例

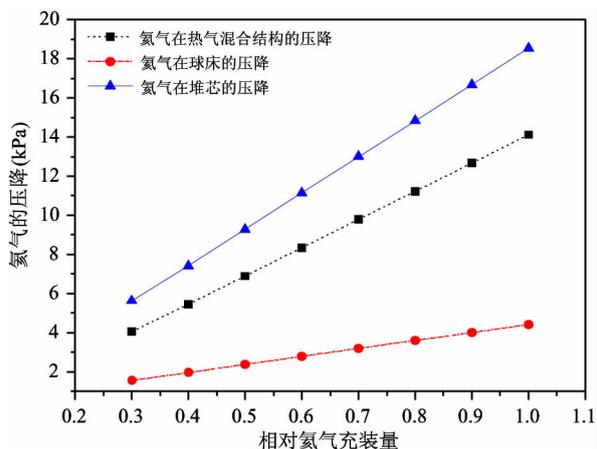


图4 氦气在反应堆内压降与氦气充装量的关系

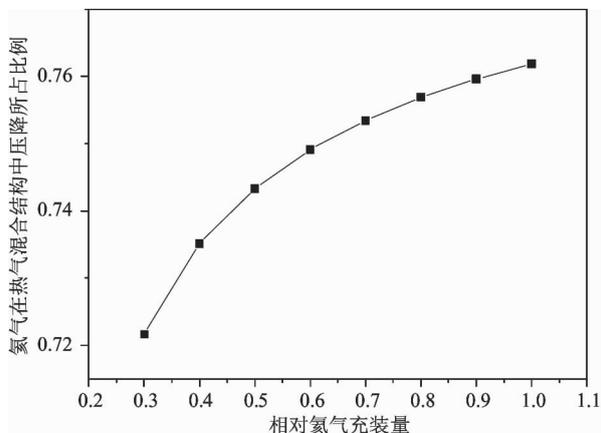


图5 氦气在热气混合结构内压降所占比例与充装量的关系

的变化趋势。氦气在反应堆内的压降由热气混合结构内的局部压降和球床内的摩擦压降两部分组成。由图4可以看出,氦气在热气混合结构内的压降随充装量线性增大,而氦气在球床部分的摩擦压降与氦气充装量呈近似线性关系,氦气在高温气冷堆内的压降与氦气充装量呈近似线性关系。由图5所示,氦气热气混合结构内的局部压降所占比例超过70%,且该比例随充装量的增加稍有增大。

换热器内部的阻力为摩擦阻力压降,随氦气充装量的增加而线性增加。如图6所示,换热器(预冷器PC、间冷器IC、回热器RC)的入、出口压力随氦气充装量的增加而线性增大。图7、图8和图9分别给出了做功部件的折合流量、压比、效率等参数与氦气充装量的关系。压气机和透平的折合流量随充装量的增加而增大,趋势不同;压气机的压比随充

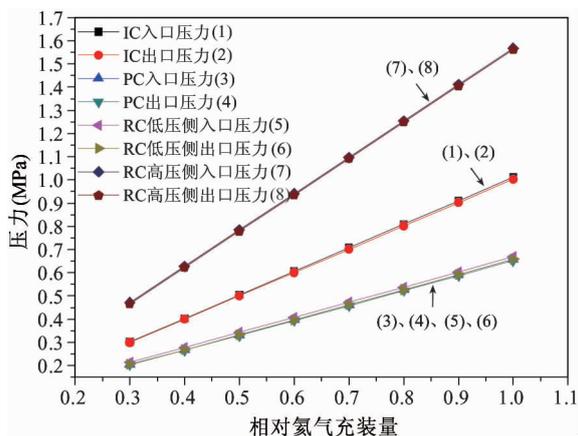


图6 换热器进出口压力与氦气充装量的关系

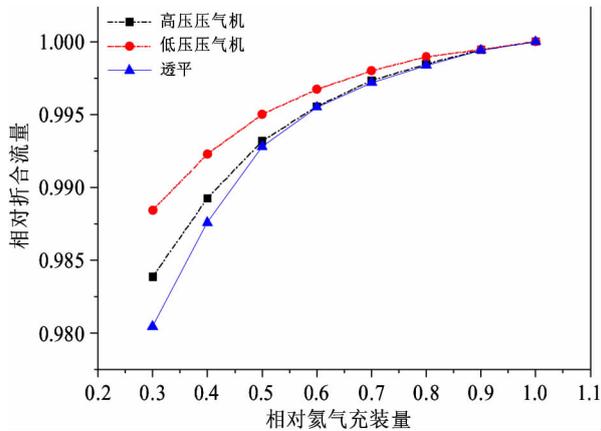


图7 做功部件的相对折合流量与氦气充装量的关系

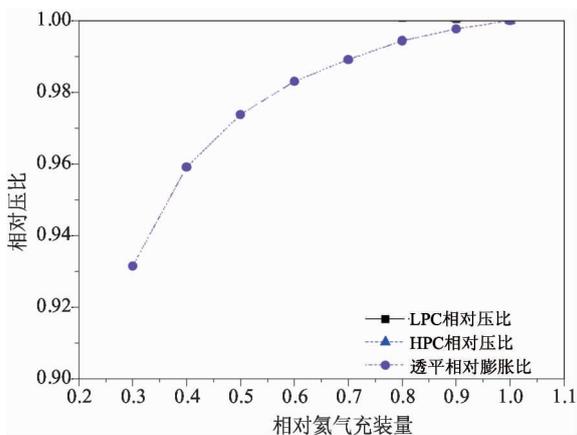


图8 做功部件的压比与氦气充装量的关系

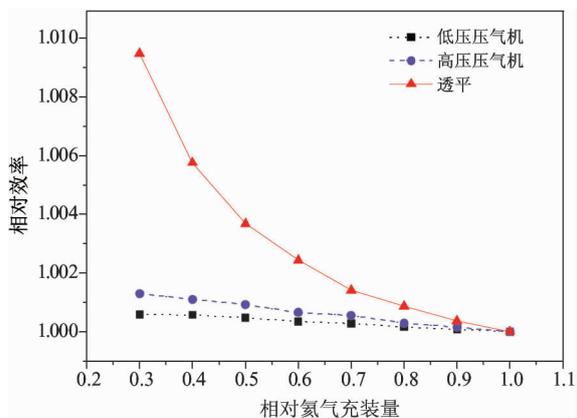


图9 做功部件的相对效率与氦气充装量的关系

装量的增加有小幅减小,而透平的膨胀比有较大幅度的增大。压气机和透平的效率随充装量的增加分别有较小和较大的降低。由此看出,系统的阻力特性对高、低压压气机的影响较小,但对透平的性能却有一定的影响,尤其是氦气充装量越低时,该影响

越明显。

3.2 充装量调节时的循环特性

以高压压气机到回热器之间的管路压降占循环压力的比值为例,由图10可以看出,该比例值随充装量的增大而减小,而且质量流量越小时该变化越明显,并不保持恒定。因此做变工况分析时假定该压降比值为一常数不够确切。而系统的循环效率受压降的影响,随充装量的增加而增大。

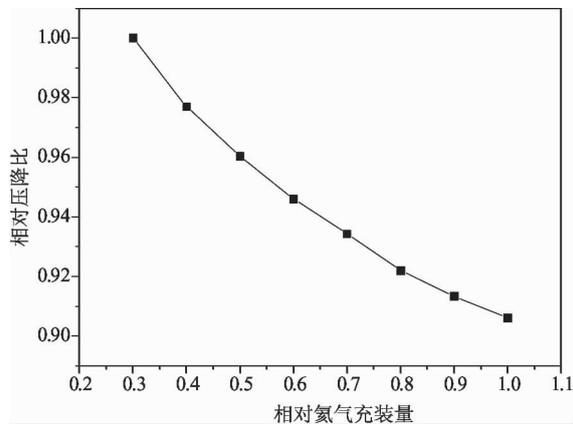


图10 压降比值与充装量的关系

氦气充装量的变化引起压气机的压比以及透平膨胀比的变化,导致循环效率的变化。由图7~图9的分析得知充装量由100%降低到30%额定值时,透平的膨胀比减小。循环可利用的膨胀减少,导致透平功率的降低略快于反应堆堆芯的降低,由文献[10]对循环效率的分析得知,闭式透平循环的效率降低。图11为循环效率与氦气充装量的关系,可以看出,

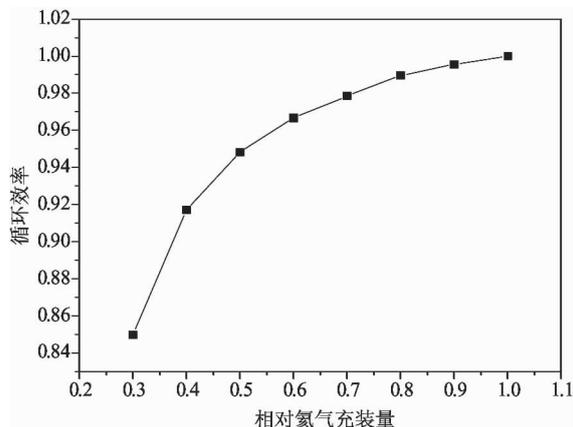


图11 相对循环效率与充装量的关系

当氦气充装量由 100% 降到 30% 时,效率减少 15% 左右,而且充装量越小,其影响越明显,尤其是充装量从 40% 降到 30% 时,循环效率下降 7% 左右。

3.3 温度调节时的阻力特性

以高压压气机到回热器之间的管路压降占循环压力的比值为例,由图 12 可以看出,该压降比值随反应堆出口温度的增大而减小,并不保持恒定值。这是因为反应堆出口温度的增大,氦气的密度减小,而影响摩擦阻力系数的雷诺数相对受氦气密度的影响较小,则摩擦压降减小。而局部压损系数在反应堆出口温度变化时保持不变,氦气的局部压降主要受氦气密度的影响,随反应堆出口温度的增加而减少。

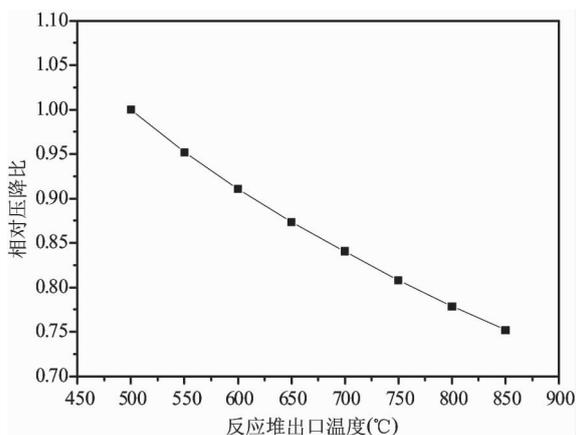


图 12 压降比值与反应堆出口温度的关系

由王捷对高温气冷堆氦气透平循环热工特性的初步研究^[10]可知,氦气透平循环的循环效率受压缩比、压气机入口温度、堆芯出口温度、各部件的效率 4 个因素的影响。系统的相对效率随反应堆出口温度的增加而增大,该变化趋势受阻力特性的影响较小,此处不再赘述。

4 结论

建立了实际的阻力模型,以 10MW 高温气冷堆氦气透平直接循环(HTR-10GT)发电系统为算例,通过分析得到以下几点结论:

(1) 高温气冷堆氦气透平循环的压降由局部压降和摩擦压降两部分组成,局部阻力系数随充装量

的增大保持不变,摩擦阻力系数随充装量的增加而减小。当氦气充装量由额定降低到 30% 时,管路中局部压降所占比例减小 20% 以上,而且充装量越小时该变化越明显。

(2) 高温气冷堆的压降主要为氦气在热气混合结构内的局部压降,且该局部压降所占比例随充装量的增加非线性增加。管路的压降占循环压力的比例随反应堆出口温度的增加而减少,随充装量的增加而减少。

(3) 实际阻力特性对换热器的性能影响较小,换热器的性能参数随充装量的变化趋势与无阻力时基本一致;而对压气机透平做功部件的影响比较明显,尤其是氦气充装量较小的情况下。

(4) 实际阻力特性导致循环效率随着充装量的减少而降低。当氦气充装量由 100% 降到 30% 时,效率减少 15% 左右,而且充装量越小其影响越明显。因此分析循环的变工况时,有必要考虑循环的实际阻力。

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] Liebenberg J. Power conversion unit for the South Africa direct cycle HTGR. In: Proceedings of the Technical Committee Meeting on High Temperature Gas Cooled Reactor Technology Development. Commercializing the HTGR, Johannesburg, R. S Africa, 1996
- [3] Wu Z, Lin D, Zhong D. The design features of the HTR-10. *Nuclear Engineering and Design*, 2002, 218: 25-32
- [4] 顾义华. 高温气冷堆气体透平循环及透平压气机基本特性研究:[硕士学位论文]. 北京:清华大学核能与新能源技术研究院, 2003
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Yu Z J, Yang X Y, Yu X L, et al. Dimensionless analysis of pressure drop and heat transfer on HTGR coupled with closed Brayton cycle. In: Proceedings of the 18th

- International Conference on Nuclear Engineering, Xi'an, China, 2010
- [8] 周杨平, 李富, 郝鹏飞等. HTR-PM 热气混合结构热工水力分析. 原子能科学技术, 2012, 46: 771-775
- [9] 任啟森, 杨小勇, 黄志勇等. 高温气冷堆的氦气透平循环工质的热物性. 汽轮机技术, 2006, 48(2): 93-94
- [10] 王捷. 高温气冷堆氦气透平循环热工特性的初步研究. 高技术通讯, 2002, 12(9): 91-95

Resistance characteristics analysis for helium turbine cycle coupled with high temperature gas cooled reactor

Jiang Huijing, Yang Xiaoyong, Ding Ming, Wang Jie

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

Abstract

The influence of the flow resistance on the property of the helium turbine cycle of the 10MW high temperature gas-cooled reactor (HTR-10) was analyzed by using a resistance model closer to real condition. The analysis results show that the total pressure drop in the Brayton cycle is comprised mainly of local pressure loss and friction loss. When the HTR-10GT generator's mass flow rate of helium is 4.77kg/s as designed, in connecting pipes, the local pressure loss accounts for 82.4%, and the friction loss is about 17.6%. The proportion of pressure drop in cycle pressure changes with outlet temperature of reactor and helium inventory. Helium inventory is one approach to control of the HTR-10GT by means of working fluid's mass flow rate. When the mass flow rate of helium decreases, the local pressure loss coefficient keeps constant and the pressure loss coefficient increases. As a result, the efficiency of the closed cycle is decreased. When the mass flow rate of helium decreases from 100% to 30% of the rated value, the percentage of local pressure drop in connecting pipes decreases about 20%, and the cycle efficiency decreases about 15%. With the decrease of helium inventory, the input pressure and output pressure of the turbomachinery decrease linearly, and the pressure ratio of compressor has a little increase while the pressure ratio of the helium turbine has a big increase.

Key words: high temperature gas cooled reactor (HTR), helium turbine cycle, pressure loss, helium inventory, cycle efficiency