

高温气冷堆氦气透平直接循环的 Exergy 分析

曹建华, 王捷, 杨小勇, 于溯源

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要: 针对 100 MW 电功率的氦气透平直接循环的设计, 对循环各个部件分别进行热力学第一和第二定律分析。给出了各个部件的输入和产出 Exergy 公式, 计算了 Exergy 损失分布, 并与按照传统分析方法获得的分析结果进行了比较。结果表明: 一半以上的 Exergy 损失发生在堆芯部分, 而由预冷器、压气机和间冷器组成的压缩系统所占 Exergy 损失比重比按照第一定律计算的能量损失份额小得多; 循环 Exergy 损失主要原因是能量形式的转换和不可逆换热。系统 Exergy 效率略高于热效率。

关键词: 热力学分析; Exergy 分析; 高温气冷堆; 布雷登循环; Exergy 损失

中图分类号: TL333

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)02-0211-04

Exergy Analysis of Gas Turbine Combined 100 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor

CAO Jian-hua, WANG Jie, YANG Xiao-yong, YU Su-yuan

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

Abstract: According to the design of 100 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor coupled with gas turbine, the energy and Exergy analysis were carried out for each part of the cycle, and inlet and outlet Exergies of those parts were calculated. The Exergy loss distribution and Exergy loss ratio of each sub-process were quantified and compared with the results of energy analysis. The results show that more than a half of the Exergy loss takes place inside the reactor core, while the compress system composed of low and high pressure compressors as well as the intercooler play a much smaller role in the contribution of Exergy losses than the results in the energy analysis. The Exergy loss of the cycle is mainly due to the energy conversion and irreversible heat exchange. The total energy efficiency of the cycle is quite high, and the Exergy efficiency is higher.

Key words: thermal analysis; Exergy analysis; high-temperature gas-cooled reactor; Brayton cycle; Exergy loss

高温气冷堆 (HTGR) 采用全陶瓷包覆颗粒燃料元件, 以石墨为慢化剂, 氦气为冷却剂^[1]。HTGR 可与各种动力转换系统耦合。高温气冷堆直接循环的发电效率最高可达 50%^[2]。国际上正在开展的 GTMHR 和 PBMR 以及中国的 HTR-10GT 设计, 均选择了直接气体透平循环方案^[3]。

联合热力学第一和第二定律的 Exergy 分析法, 提供了不同质能量的等价换算, 近年来发展很快^[4-6]。本工作对氦气透平直接循环^[4]进行 Exergy 分析, 给出循环各部件的 Exergy 损失分布, 并与按照传统热力学分析方式得出的结论进行对照分析。

1 氦气透平直接循环及其热力学分析

高温气冷堆氦气透平 (HTGR-GT) 直接循环是一个实际的布雷登循环, 带有回热、预冷和间冷过程, 循环流程和温熵分别示于图 1、2。直接循环系指高压氦气在高温堆堆芯加热后直接推动气体透平发电机组的 1 种循环方式, 工质是一回路冷却剂氦气。加压氦气经堆芯后被加热至高温, 经由堆芯出口 4 直接进入透平做功; 透平带动发电机发电的同时也带动压气机压缩氦气; 透平出口 5 排出的尾气经回热器低压侧出口 6 将余热传给高压侧氦气, 然后进入预冷器降至低温; 低温氦气进入带有中间冷却器 (间冷器, 2a-2b) 的压气机组被压缩成高压氦气; 高压氦气经回热器高压侧后由高压出口 3 排出, 此时, 氦气温度接近透平的排气温度, 然后再进入堆芯, 重复被加热过程^[3]。

热力学分析基于以下假设: 1) 循环无内泄漏, 稳态 (暂无旁路阀等功率调节器), 质量守恒自然成立; 2) 冷却剂氦气在整个循环内接近理想气体^[7], 等熵指数 $k=1.667$, 绝热因子 $\varphi=(k-1)/k=0.4$, 比定压热容 $c_p=5.198 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 3) 预冷器进口温度与间冷器进口温度均为 35°C ; 4) 高、低压气机等熵效率相等。

Exergy 被定义为系统可逆变化到与环境 ($25^\circ\text{C}, 0.1 \text{ MPa}$) 热力学平衡时所做的最大功:

$$E = G(H - T_0 S) \quad (1)$$

式中: E 为 Exergy, W ; G 为质量流量, kg/s ; H 为焓, J/kg ; T_0 为环境温度, K ; S 为熵, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

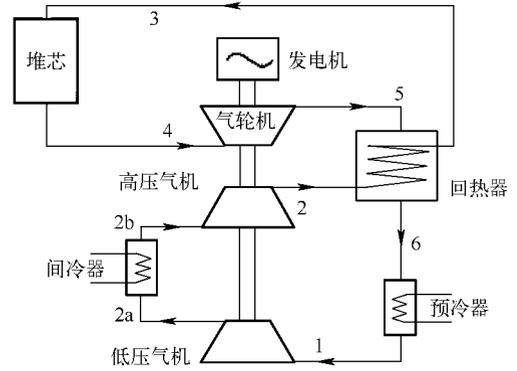


图 1 HTGR-GT 直接循环流程
Fig. 1 Direct cycle of HTGR-GT

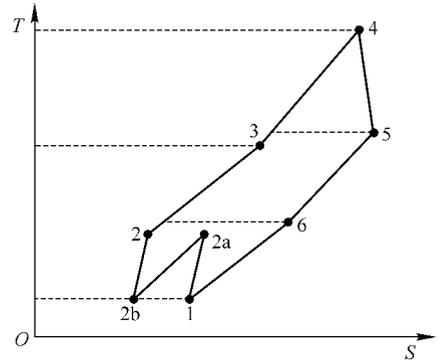


图 2 带有回热过程的布雷登循环温熵图

Fig. 2 T-S diagram of Brayton cycle with recuperator

系统输入和 Exergy 分别用 E_{x1} 和 E_{x2} 表示。系统 Exergy 损失为:

$$E_{xl} = E_{x1} - E_{x2} \quad (2)$$

Exergy 分析法一般通过 Exergy 损失系数 $R_{Ex,i}$ 和损失率 d_i 衡量, 定义为:

$$R_{Ex,i} = \frac{E_{xl,i}}{Q_R} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $R_{Ex,i}$ 为部件 i 的 Exergy 损失 $E_{xl,i}$ 占系统总供给 Exergy 的比值, 这里即为对堆芯吸热量 Q_R 的比值。

$$d_i = \frac{E_{xl,i}}{\sum E_{xl,i}} \quad (4)$$

式中: d_i 为部件 i 的 Exergy 损失 $E_{xl,i}$ 占系统总的 Exergy 损失 $\sum E_{xl,i}$ 的比例。

针对循环的 8 个子过程 (7 个部件) (图 1、2) 分别进行热力分析。

1) 堆芯

堆芯热功率, 即冷流吸热量 $Q_R = G(H_4 -$

H_3)。核能属于高级能,可简化认为 $E_{x1} = Q_R$ 。氦气介质得到的 Exergy 为:

$$E_{x2} = G[H_4 - H_3 - T_0(S_4 - S_3)] \quad (5)$$

2) 回热器

在高温气冷堆氦气透平直接循环中,压力和温度变化范围决定了可将氦气作为理想气体处理。热介质放热 Exergy 值为:

$$E_{x1} = \int_{T_6}^{T_5} (1 - \frac{T_0}{T}) Gc_p dT + GRT_0 \ln \frac{p_5}{p_6} = Q_1 - Gc_p T_0 \ln \frac{T_5}{T_6} + GRT_0 \ln \frac{p_5}{p_6} \quad (6)$$

式中: c_p 为比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; R 为气体常数, $J/(kg \cdot K)$; Q 为吸热量, W 。

冷介质吸热 Exergy 值为:

$$E_{x2} = \int_{T_2}^{T_3} (1 - \frac{T_0}{T}) Gc_p dT + GRT_0 \ln \frac{p_3}{p_2} = Q_2 - Gc_p T_0 \ln \frac{T_3}{T_2} + GRT_0 \ln \frac{p_3}{p_2} \quad (7)$$

3) 预冷器

热介质放热 Exergy 值为:

$$E_{x1} = \int_{T_1}^{T_6} (1 - \frac{T_0}{T}) Gc_p dT + GRT_0 \ln \frac{p_6}{p_1} = Q_1 - Gc_p T_0 \ln \frac{T_6}{T_1} + GRT_0 \ln \frac{p_6}{p_1} \quad (8)$$

冷却水吸收热量全部排入环境, $E_{x2} = 0$ 。

4) 间冷器

热介质放热 Exergy 值为:

$$E_{x1} = \int_{T_{2,2}}^{T_{2,1}} (1 - \frac{T_0}{T}) Gc_p dT + GRT_0 \ln \frac{p_{2,1}}{p_{2,2}} = Q_1 - Gc_p T_0 \ln \frac{T_{2,1}}{T_{2,2}} + GRT_0 \ln \frac{p_{2,1}}{p_{2,2}} \quad (9)$$

冷却水吸收热量全部排入环境, $E_{x2} = 0$ 。

5) 透平

透平的功率 $E_{x2} = N_i = G(H_4 - H_5)$ 。

因机械能为高级能,氦气放出的 Exergy 值 $E_{x1} = G(H_4 - H_5 - T_0(S_4 - S_5))$ 。

6) 低压压缩机

压缩机原动力功率为:

$$E_{x1} = N_p = G(H_{2,1} - H_1) \quad (10)$$

氦气在压气机内所得到的 Exergy 值为:

$$E_{x2} = G(H_{2,1} - H_1 - T_0(S_{2,1} - S_1)) \quad (11)$$

7) 高压压缩机

压缩机原动力功率为:

$$N_p = G(H_2 - H_{2,2}) \quad (12)$$

氦气在压缩机内所得到的 Exergy 值为:

$$E_{x2} = G(H_2 - H_{2,2} - T_0(S_2 - S_{2,2})) \quad (13)$$

2 计算结果与讨论

将循环参数带入式(5)~(13),可得高温气冷堆氦气透平直接循环 Exergy 损失分布。计算结果列于表 1。从表 1 可看出:1) 堆芯部分所占的 Exergy 损失超过整个系统其它部件的总和,堆芯裂变材料的核能向冷却剂热能的转换属于高级能向低级能的不可逆转换,从而导致系统 Exergy 损失;2) 回热器部件尽管回热度按 95% 计算,但传热温差的存在和换热不可逆而导致 Exergy 损失,预冷器和间冷器则因通过不可逆换热将热量直接排出循环而导致 Exergy 损失,回热器、预冷器和间冷器的 Exergy 损失占系统 Exergy 的约 3 成;3) 作为循环中的机械部件,透平和高、低压压气机则分别由于绝热膨胀的不可逆、能量形式的转变以及绝热压缩过程不可逆而导致 Exergy 损失,它们所占 Exergy 损失份额在循环中最低。

表 1 HTGR-GT 直接循环 7 个部件的 Exergy 损失分布

Table 1 Exergy loss distributions in 7 components of HTGR-GT

过程	Exergy 损失/ MW	$E_{Ex,i}/$ %	d_i
堆芯	97.61	30.51	51.03
透平	11.54	3.61	8.51
回热器	13.39	4.19	9.88
预冷器	17.92	5.6	13.2
低压压气机	6.82	2.13	5.02
间冷器	10.50	3.28	7.73
高压压气机	6.30	1.97	4.64
	(164.08)	(51.28)	(100)

注:最后一行括号内的数值为其对应的总合

采用 Exergy 分析得出的循环 Exergy 效率为 48.73%,略高于热力学第一定律计算出的热效率 47.9%^[3]。基于 100 MW 高温气冷堆数据的 HTGR-GT 直接循环的 Exergy 和能量损失对照示于图 3。

由图 3 可知:按照传统能量平衡分析法得到的系统能量损失只发生在冷却部件间冷器和

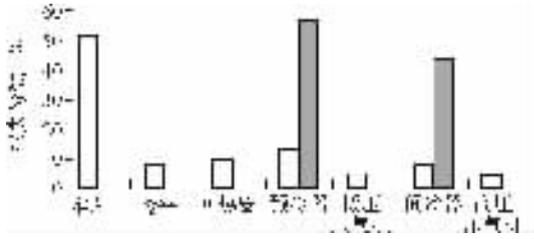


图3 基于100 MW高温气冷堆数据的
Exergy和能量损失分布对照

Fig.3 Comparison between Exergy loss and energy loss distributions based on data of 100 MW High-Temperature Gas-Cooled Reactor
□——Exergy; ■——能量损失

预冷器上,与其他部件无关;从按照Exergy分析方法得出的结果可看出,其它部件,特别是堆芯,虽无能量数量上的损失,但因能量形式的高低转换和温度高低的品质降低,导致了大量的Exergy损失,而预冷器和间冷器因处于循环的低温段,能量品质相对较低,它们约占系统Exergy损失的20%。可见,Exergy分析法不仅表达了能量数量上的损失,还揭示了系统能量转换和转移过程中的不可逆损失,即能量贬值。

3 结论

与传统的热力学第一定律的能量分析方法相比,Exergy分析方法不仅考虑了能量数量上的损失,而且区别出了能量的品质。针对100 MW高温气冷堆参数数据的Exergy分析结果显示,堆芯部分的能量形式转换是系统的最大Exergy损失所在,传热部件,包括回热器因传热温差的存在所导致Exergy损失与预冷器的Exergy损失相当;按照传统分析方法,能量损失很大的间冷器因损失的热能温度低,能量品质差,所损失的Exergy与透平以及高低

压气机一样的小。Exergy分析方法比传统能量分析方法得出的同一循环的效率略高。与传统的热力学分析方法相比,采用基于热力学第二定律的Exergy分析方法更加全面地揭示了系统能量的损失分布,对于改进系统设计和提高系统用能效率指明了研究方向。

参考文献:

- [1] 王捷. 高温气冷堆技术背景和发展潜力的初步研究[J]. 核科学与工程, 2002, 22(4): 325-330.
WANG Jie. Preliminary study on technical base and future potential of high temperature gas-cooled reactor [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2002, 22(4): 325-330 (in Chinese).
- [2] 董玉杰, 王傲巍. 高温气冷堆间接联合循环热力学分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(3): 224-229.
DONG Yujie, WANG Aowei. Thermodynamic analysis of indirect combined cycle for HTR [J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2004, 24(3): 224-229 (in Chinese).
- [3] WANG Jie, GU Yihua. Parametric studies on different gas turbine cycles for a high temperature gas-cooled reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(16): 1 761-1 772.
- [4] 彭敏俊. 核动力装置热力分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003.
- [5] WILLIAM R D, SCOTT D M, NOAM L. Exergy analysis of an operating boiling-water-reactor nuclear power station [J]. Energy Conversion and Management, 1995, 36(3): 149-159.
- [6] AHMET D, HASBI Y. Exergy analysis of a pressurized-water reactor nuclear-power plant [J]. Applied Energy, 2001, 69(1): 39-57.
- [7] 居怀明, 徐元辉, 李怀萱, 等. 载热质物性计算程序及数据手册[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.