

高温气冷堆回热循环及透平机组的初步研究

陈夷华,王捷,张作义

(清华大学核能技术设计研究院,北京 100084)

摘要:结合了模块式高温气冷堆与气体透平循环技术的高温堆气体透平循环是核电领域中的全新概念,为提高核电的安全性和经济性提供了新的思路,具有很强的竞争优势。其中,高温气冷堆回热循环是该方案的主流。在高温堆回热循环方案中,氦气透平机组的工作介质为氦气,其物性与空气有很大的不同,因此,氦气透平与燃气透平在热力参数、气动参数、尺寸、级数等方面有着较大的差别。本研究对回热循环以及氦气透平进行了初步分析,并通过与燃气透平比较,揭示了回热循环与氦气透平的一些基本设计特点。

关键词:高温气冷堆;回热循环;燃气透平,氦气透平

中图分类号:TK14 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-6931(2003)05-0451-05

Preliminary Study on Helium Turbomachine for High Temperature Gas-cooled Reactor

CHEN Yi-hua, WANG Jie, ZHANG Zu-yi

(Institute of Nuclear Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the high temperature gas-cooled reactor (HTGR), gas turbine cycle is a new concept in the field of nuclear power. It combines two technologies of HTGR and gas turbine cycle, which represent the state-of-the-art technologies of nuclear power and fossil fuel generation respectively. This approach is expected to improve safety and economy of nuclear power plant significantly. So it is a potential scheme with competitiveness. The heat-recuperated cycle is the main stream of gas turbine cycle. In this cycle, the work medium is helium, which is very different from the air, so that the design features of the helium turbomachine and combustion gas turbomachine are different. The paper shows the basic design consideration for the heat-recuperated cycle as well as helium turbomachine and highlights its main design features compared with combustion gas turbomachine.

Key words: high temperature gas-cooled reactor; heat-recuperated cycle; gas turbine; helium turbomachine

收稿日期:2002-07-28;修回日期:2002-09-23

作者简介:陈夷华(1976—),男,浙江龙泉人,在读博士研究生,工程物理专业

20世纪70年代末80年代初,德国专家提出模块式高温气冷堆概念。90年代,随着模块堆理论的成熟和大型燃气透平的发展,使两者以一堆一机的形式相结合成为可能。目前,综合了模块式高温气冷堆与气体透平循环这两项分别代表着当今核能和常规发电先进技术的高温堆气体透平循环是核电领域中的全新概念,为提高核电安全性和经济性提供了新思路,有很强的竞争优势。至今,已有许多国家投入相当的人力和物力,并广泛开展国际合作来研究开发高温堆气体透平循环,较为瞩目的有南非的PBMR和美俄合作的GF-MHR。目前,高温堆氦气透平直接循环尚处于论证、设计、审查阶段,至今还未有一个方案付诸实施^[1-3]。

高温堆气体透平循环需要解决的问题很多。其中,循环中的关键部件——氦气透平是众多问题中的核心,包括涡轮和压气机。氦气透平的工作介质为氦气,其物性与空气不同,因此,氦气透平与燃气透平在气动、尺寸、级数等方面有着较大的差别。本工作将对氦气循环以及氦气透平进行初步分析,并通过与燃气透平的比较,揭示氦气透平的一些基本设计特点。

1 高温堆回热循环分析

1.1 循环简介

高温堆回热循环主要用回热器对涡轮出口高温尾气进行余热利用,它是目前高温堆气体透平循环发电设计方案中的主流,正处于概念设计和可行性研究阶段。如图1所示,回热循环在简单布雷登循环中加入了回热器和间冷器。回热器可回收氦气透平尾气的能量并用来加热反应堆进口气体,间冷器可减少压气机做功,从而提高发电效率。如美国的GF-MHR,发电效率可达47.7%,南非的PBMR可达44.1%^[4,5]。但高温堆回热循环要求回热器功率较大(与反应堆本体功率相当),反应堆进口气体温度较高(由 T_2 升到 T_3),一回路气体流量较大(因为反应堆温差由 $T_4 - T_2$ 降至 $T_4 - T_3$)。

1.2 效率分析

影响循环效率的因素有多种,可用如下关系式表示:

$$= (T_1, \eta_0, T_4, \dots)$$

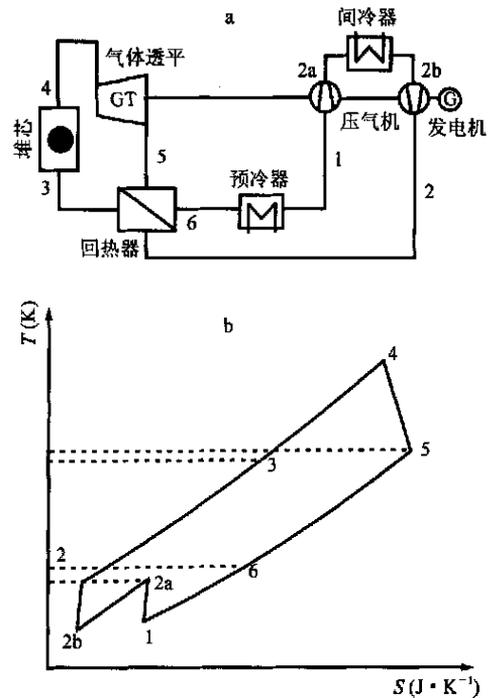


图1 回热循环流程图与温熵图

Fig. 1 Sketch of heat-recuperated cycle and combined cycle and temperature-entropy map
a——回路图;b——温熵图

其中: T_1 为压气机进口温度; η_0 为各部件效率(包括回路压力损失); T_4 为堆芯出口温度;为循环压比。

压气机进口温度 T_1 越低,压气机做功越少,效率则越高。该参数一般为环境温度,没有太大的变动,因此,不作详细分析。

各部件效率 η_0 直接影响循环效率,部件效率越高,循环效率越高。部件效率主要受当今制造技术水平的限制。经过初步调研,各部件所能达到的效率分别为:涡轮,90%;压气机,89%;回热器,95%;发电机,98%;回路压力损失,5%。

堆芯出口温度 T_4 的提高可带来效率的显著提高(图2)。从目前的技术条件来看,涡轮进口温度已高达1600^[6],足够承受堆芯出口的高温气体。高温堆目前出口温度在900左右,提高到1150也有可能^[6]。随着材料科学和相关技术的发展,堆芯出口温度可进一步提高。例如,堆芯出口温度提高到为1300~1400时,效率可望达到60%。

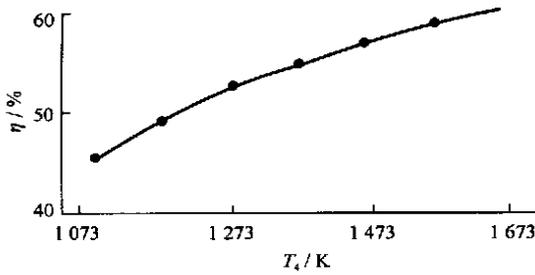


图2 堆芯出口温度-效率图

Fig. 2 Relation between the core exit temperature and efficiency

压比与循环效率的关系较为复杂。从图3可看出:压比较低时,压比升高,效率增加,达到最大值后,效率降低。压比升高,循环输出功率增加,有利于循环效率的提高;同时,回热器对循环贡献却随之减小,热源吸热增加,不利于循环效率提高。正是在这两个相反因素的共同影响下,回热循环效率随压比的变化出现了极大值。

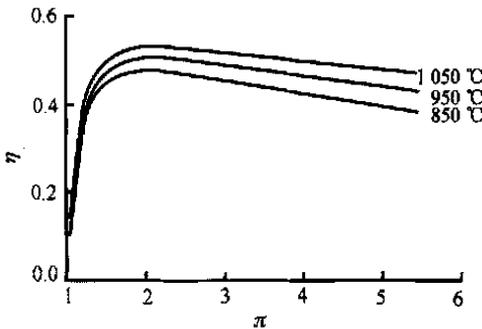


图3 压比-效率图

Fig. 3 Relation between efficiency and pressure ratio

1.3 优化分析

优化分析系指在目前技术条件下实现循环效率的最大化,以提高其经济性。可表示为 $\max(\eta(T_1, T_0, T_4, T_3))$ 。其中,约束条件为 $T_3 = 823 \text{ K}$ (T_3 为堆芯进口温度)。影响效率的上述4个因素中, T_1 由环境温度决定,一般取 303 K ; T_0 由各部件的当前技术条件决定;堆芯出口温度 T_4 取 1173 K ,高温堆多年运行经验表明,在此温度条件下,既能重复发挥高温堆的高温特性,又能够保证反应堆的安全。由此,优化分析可表示为 $\max(\eta)$,约束条件 $T_3 = 1323 \text{ K}$ 。 $T_3 = 1323 \text{ K}$ 是为限制堆芯进口温度过高,这是由反应堆进口结构与压力容器材料决定的。一般来说,温度在 350 以下,反应堆压

力容器可采用与轻水堆相类似的碳钢;高于 350 则需采用高温合金钢或设置冷却装置。因回热循环堆芯进口温度较高,因此,只能采用高温合金钢或设置冷却装置。经计算,在达到效率最大值的压比条件下,无法满足此约束条件,因此,需要提高压比,以牺牲效率来降低堆芯进口温度。例如:在堆芯出口温度为 900 、压比为 2.2 时,效率最大,为 50.8% ,堆芯进口温度为 603 ;压比为 2.72 时,效率为 50.2% ,堆芯进口温度为 543 。

通过上述优化分析与计算得出高温气冷堆回热循环在堆芯出口温度为 900 时的优化循环方案如下:堆热功率, 200 MW ;堆芯出口温度, 900 ;堆芯进口温度, 543.0 ;堆芯进口压力, 7.0 MPa ;压比, 2.72 ;氦气质量流量, 107.9 kg/s ;氦气涡轮排气温度, 566.3 ;氦气涡轮功率, 187.1 MW ;压气机进口温度, 30 ;压气机功率, 84.7 MW ;循环效率, 50.2% 。

2 氦气透平机组

2.1 机组结构

典型的高温堆透平机组由涡轮、高压压气机、低压压气机组成。有单轴立式整体布局、双轴和多轴分布式布局3种方案。

在单轴立式整体布局方案中,透平机组与发电机组安装在同一轴线上,且均布置在同一压力容器内。该方案结构紧凑、启动方便、堆机调节系统简单、转速与电网频率相同。但单轴技术难度大,共振密封等问题不易解决。

在双轴分布式布局方案中,涡轮分为高压涡轮和动力涡轮,前者带动高压压气机、低压压气机,并与其一同置于高压压力容器内;后者带动发电机发电,并与其置于低压压力容器内。高压容器内转动设备的转速选择可不受发电机频率的限制,压气机与高压涡轮的级数少、尺寸小、性能好,容易设计。动力涡轮的转速与电网频率相同,不需变频系统。缺点是低压容器内轴向力不易平衡、启动复杂(用电机先启动动力涡轮,间接启动高压系统)、控制复杂。

在多轴分布式布局方案中,涡轮分为高压涡轮、低压涡轮和动力涡轮,分别带动高压压气机、低压压气机与发电机组,并置于3个压力容器内。该方案的优缺点与双轴分布式布局方案

相同。南非 PBMR 采用此布局^[5]。

2.2 几点定性分析

1) 从整体的能量关系来看,有 $E = c_p \cdot T \cdot G$ 。其中: E 为透平功率; c_p 为气体比定压热容; T 为透平进出口温差; G 为氦气流量。在透平功率、进出口温差相同的条件下,流量 G 与气体比定压热容 c_p 成反比。氦气的比定压热容是空气比定压热容的 5 倍,因此,氦气透平流量远小于燃气透平。流量小则叶片短。由于间隙效应,过短的叶片造成损失过大,不利于实现高效率透平。

2) 结合总体与叶轮,有 $c_p \cdot T \cdot G = H \cdot n \cdot G$ 。 H 为每级的焓降, n 为透平级数。由此可看出,若氦气透平与燃气透平的级焓降 H 相同,则透平级数与比定压热容成正比,氦气透平的级数将大大增加。

3) 载荷系数 $= H/u^2$ (u 为叶片平均直径处的圆周速度) 与每级焓降成正比,因此,适当提高载荷系数可减少透平级数。另外,载荷系数与 u^2 成反比,因此,增大 u ,透平级数少,性能高,但增大 u 则受材料强度限制。

4) 空气与氦气中的声速相差近 3 倍,故氦气透平马赫数较低。这样可适当提高载荷系数,而不必考虑超音速问题,且损失减小,效率增大。另外,氦气透平和燃气透平的雷诺数均较大(约 10^6),皆进入自模区,对效率影响不太大。

2.3 分析与比较

为使计算过程简化,又不影响结论的正确

性,做如下假设:1) 级内流动为一元绝热定常流动;2) 叶片较短,可近似认为气流参数沿叶高不变;3) 线形扩张或渐缩流道。

图 4 为 200 MW 高温堆回热循环优化方案的氦气透平机组结构图。表 1 为针对 GF-MHR 的计算结果以及与工业燃气透平机组的比较。表 2 为 200 MW 高温回热循环氦气透平机组的初步设计方案。

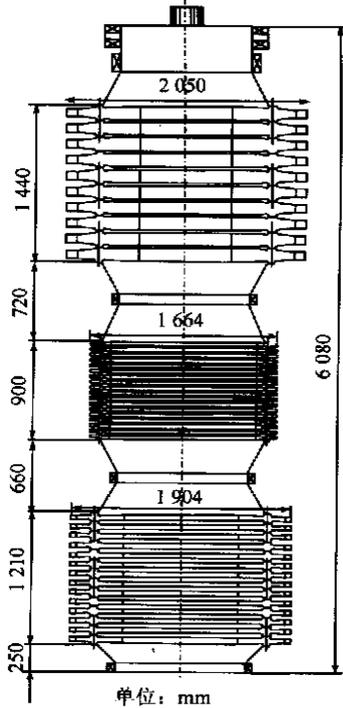


图 4 200 MW 高温堆回热循环氦气透平机组结构图

Fig. 4 Helium turbomachine configuration for 200 MW HTGR heat-recuperated cycle

表 1 氦气透平机组与工业燃气透平机组的比较

Table 1 Comparison between helium turbomachine and gas turbine

机组	功率/ MW	透平入口 温度/ °C	转速/ (r min ⁻¹)	透平部件类型 及级数	结构及热力参数					功率/ MW	效率/ %	
					叶尖直 径/mm	叶片高 度/mm	流量 系数	载荷 系数	压比			
GF-MHR 氦气透平	286	850	3 600	压气机 低压 14 级	第 1 级	1 684	109.2	0.51	0.33	1.69	136	89.8
					最末级	1 661	99.1	0.43	0.31			
				高压 19 级	第 1 级	1 372	66.0	0.73	0.37	1.70	139	88.3
					最末级	1 372	66.0	0.55	0.35			
大型工业 空气透平	226	1 288	3 000	透平机 11 级	第 1 级	1 707	170.2	0.44	1.92		565	90.9
					最末级	1 783	208.3	0.64	1.83			
GIMS9001F				压气机 18 级	第 1 级	2 515	508.0	0.53	0.25	15	259	89
					最末级	2 017	193.0	0.27	0.3			
				透平机 3 级	第 1 级	2 819	198.1	0.26	1.40		485	90
					最末级	3 251	520.7	0.76	1.30			

表2 200 MW 高温气冷堆回热循环氦气透平初步设计方案

Table 2 Primary design approach of helium turbomachine for 200 MW HTGR heat recuperated cycle

参量	涡轮 10 级		压气机高压 18 级		压气机低压 13 级	
	第 1 级	最末级	第 1 级	最末级	第 1 级	最末级
根部半径(mm)	950	950	800	800	910	910
叶片高度(mm)	75	100	32	32	42	42
叶尖速度(m/s)	314.2	318.9	261.4	261.4	299.1	299.1
静叶出口角	14	19.5	90	90	90	90
动叶出口角	20	24	32	23.5	31	22.5
流量系数	0.43	0.57	0.40	0.30	0.37	0.29
载荷系数	1.89	1.84	0.36	0.30	0.38	0.30
膨胀比		2.54		1.66		1.64
功率(MW)		187.8		44.7		42.8
效率(%)		90.0		88.9		89.0

综合表 1 和 2 可得出氦气透平的以下特点:1) 尺寸小,流道扩张或缩小平缓;2) 级数多,制造与安装较复杂;3) 马赫数小,氦气声速大,无须考虑超音速的限制;4) 载荷系数较燃气透平高,可减少级数,如对氦气透平,涡轮的载荷系数为 1.8~2.0,压气机为 0.3~0.4;对燃气透平,涡轮的载荷系数为 1.2~1.5,压气机为 0.2~0.3;5) 马赫数小,损失小,效率高。

3 结论

通过对高温气冷堆回热循环以及氦气透平进行的初步分析,得出了其基本参数,诸如外形与流道尺寸、级数、叶片、马赫数、载荷系数、流量系数、效率等的设计特点。200 MW 高温气冷堆在堆芯出口温度为 900 条件下,回热循环效率为 50.2%。在氦气透平机组中,涡轮为 10 级,效率 90.0%,功率 187.8 MW;低压压气机 13 级,效率 89.0%,功率 42.8 MW;高压压气机 18 级,效率 88.9%,功率 44.7 MW;氦气透平机组总长 6 080 mm,最大直径 2 100 mm。

参考文献:

- [1] op het Veld RP, van Buijtenen JP. An Empirical Approach to the Preliminary Design of a Closed Cycle Gas Turbine [A]. Helium Gas Turbine Reference Papers, Supplement to Helium Turbomachine Design Presented at GFMHR Advanced Training Course for Chinese Delegation[C]. [s.l.]:[s.n.],1995.45~53.
- [2] McDonald CF, Orlando RJ, Cotzas GM. Helium Turbomachine Design for GFMHR Power Plant[A]. Helium Gas Turbine Reference Papers, Supplement to Helium Turbomachine Design Presented at GFMHR Advanced Training Course for Chinese Delegation[C]. [s.l.]:[s.n.], 1995.1~11.
- [3] Gblovko VF, Kiryushin AI, Kodochigov NG, et al. State of HTGR Development in Russia: IAEA TECDOC-899 [R]. Vienna: IAEA, 1995.
- [4] Andrew C. Nuclear Power Plant Design Project [R]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1998.
- [5] Anon. Pebble Bed Modular Reactor Executive Summary [R]. South Africa: ESKOM, 1999.
- [6] 陈夷华,王捷,张作义. 高温气冷堆联合循环技术潜力研究[J]. 核动力工程, 2001, 22(5): 475~480.