

# 10 MW 高温气冷堆一回路氦气品质研究

朱江, 李智慧

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201)

**摘要:** 10 MW 高温气冷堆以氦气作为冷却剂, 氦气中含有 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>、CO、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 等 7 种影响氦气品质的杂质。分析反应堆在不同工况下的氦气品质数据的变化规律, 可证明一回路氦气在反应堆功率运行过程中经氦气净化系统净化后, 氦气品质能够满足技术规格书要求。但随一回路氦气平均温度的升高, 氦气品质呈下降趋势, 并可初步判断存在缓慢变化的杂质源项为水。

**关键词:** 高温气冷堆; 一回路; 氦气品质;

**中图分类号:** O645.15      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931 (2010) S0-0274-05

## Research on Quality of Helium Gas in Primary System of 10 MW High-Temperature Gas-Cooling Reactor

ZHU Jiang, LI Zhi-hui

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

**Abstract:** The primary coolant of 10 MW High-Temperature Gas-Cooling Reactor is helium gas which contains 7 types of impurities affecting the quality of the coolant. These impurities include H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>. By analyzing quality variation of helium gas for the reactor working on different conditions, the following conclusions were draw. At first, after being purified by the helium purification system, the helium gas can meet the quality requirements of the technical specifications during the power operating of the reactor. Secondly, the helium gas's quality decreases when the temperature of the helium gas in the primary system increases. Finally, water is the source item for the slowly changing of impurities.

**Key words:** high-temperature gas-cooling reactor; primary system; helium gas quality

模块式高温气冷堆具备固有安全性好, 能用于高效发电和高温工艺供热等特点, 是一种先进核反应堆。这种反应堆一般使用石墨材料制作的构件搭建堆芯结构, 并使用氦气作为一回路冷却剂。由于氦气拥有化学上的惰性、良好的核性能、较好的传热和载热特性、操作方便和易于净化等优点, 成为了高温石墨型反应堆中最理想的冷却剂和载热剂。

为发展这种反应堆, 清华大学首先设计建造

了 1 座 10 MW 高温气冷实验反应堆 (HTR-10)。在高温气冷堆运行过程中, 会有诸如 H<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O、CO、O<sub>2</sub> 等杂质进入到一回路氦气中, 在高温下与石墨发生反应生成气态物质, 腐蚀堆芯结构。一回路氦气中杂质的主要来源有: 1) 初装氦气中的杂质和其它气体; 2) 回路充氦前, 容器和管道内壁、结构材料 (特别是内保温层材料) 吸附的气体; 3) 各种水冷却器、热交换器和蒸汽发生器水侧向氦气侧的渗漏等<sup>[1]</sup>。



铜床,流出氧化铜床后,被去除了 $H_2$ 和 $CO$ 的氦气经两级氦-氦热交换器和一级水-氦热交换器降温后进入分子筛床,流过分子筛床后的氦气中应仅有 $N_2$ 、 $CH_4$ 和少量的 $O_2$ (在氧化铜床中已有部分 $O_2$ 与 $Cu$ 反应生成 $CuO$ ),以及 $Ar$ 、 $Kr$ 等放射性裂变产物,这些杂质均由深冷活性炭床所吸附。流经深冷活性炭床后的氦气为净化后氦气,经氦-氦热交换器升温并用氦气膜压机加压后重新回到反应堆一回路。反应堆正常运行时,氦净化系统以每小时5%一回路氦装量的流量净化一回路冷却剂。氧化铜床、分子筛床在额定工况下的净化效率为95%。

## 1.2 气体采样和分析系统

为监测反应堆一回路氦气品质、监测氦气净化系统各气体净化设备的工作状况和净化效率,HTR-10设置了1套气体采样和分析系统。如图1所示,气体采样和分析系统在氦净化系统回路中设置了4个取样点,分别为:净化前、净化后、氧化铜床出口和分子筛床出口。净化前取样点处的氦气因取自一回路且未经净化,其

样品气用于分析反应堆一回路压力壳内氦气品质,从净化后取样点取出的样品气用于监测净化后氦气品质并比对整个氦气净化系统的净化效果,另外两个取样点用于监测氧化铜床和分子筛床的工作效果和工作状态,例如,设备是否需要再生等。为监测氦气品质,气体采样和分析系统配置了两台仪器,1台是用美国GOW-MAC公司生产的GM-592型专用气相色谱仪,内部配置了放电电离氦离子化检测器。可在10 min内完成对样品氦气中 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 杂质含量的取样和测量,灵敏度为20 ppb,另1台为巴拿公司生产的M系列氧化铝湿度计,测量气体露点温度的范围为 $-110\sim+20$  °C,相对应的水蒸气含量为 $0.001\ 3\sim 25\ 000$  ppm<sup>[3]</sup>。

## 2 反应堆一回路氦气品质讨论

2003年至2007年初,HTR-10均曾在供暖季节进行连续运行。现就一部分运行数据对其一回路氦气品质进行讨论。

表2为2005年11月8日—9日期间,反应堆从

表2 反应堆提升功率过程中一回路氦气杂质浓度变化

Table 2 Concentration variation of helium gas impurities for primary system during reactor power raising

时间 (2005年11月)	功率/kW	堆芯出口石墨 构件温度/°C	杂质浓度/ppm						$H_2O$ 露点温度/°C
			$H_2$	$O_2$	$N_2$	$CH_4$	$CO$	$CO_2$	
8日9:47	0	22.01	0.30	0.33	1.72	—	—	0.24	-76.0
8日11:24	260	50.10	—	—	1.24	—	0.09	0.28	-76.1
8日12:58	1 000	215.91	0.61	—	0.79	0.03	0.35	0.32	-76.2
8日14:02	1 800	256.08	—	0.31	0.66	0.02	0.44	0.21	-76.3
8日14:35	2 155	335.14	0.53	—	0.68	0.1	0.66	0.58	-75.8
8日14:46	2 300	358.48	0.34	—	0.66	0.06	0.67	0.50	-75.7
8日15:10	2 650	426.20	0.30	0.07	0.61	0.08	0.85	0.56	-76.0
8日16:10	2 710	497.51	0.56	—	0.56	0.07	0.95	0.66	-76.6
8日16:47	2 658	510.14	0.70	0.10	0.63	0.12	1.06	0.8	-76.6
8日17:53	2 734	538.34	1.08	0.07	0.55	0.13	1.04	0.84	-76.3
8日20:32	2 897	576.58	1.46	—	0.54	0.16	1.30	1.04	-76.2
9日04:34	3 083	667.71	1.89	0.07	0.56	0.21	1.59	1.26	-76.5
9日06:29	3 459	710.77	2.61	0.08	0.59	0.16	1.91	1.30	-76.8
9日10:01	3 708	746.30	3.37	—	0.55	0.21	1.87	1.50	-76.7

“零”功率启动至3.7 MW功率运行过程中,反应堆堆芯出口处堆内构件温度和堆内杂质浓

度数据列表。表中所列 $H_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 的数据由气相色谱仪测得。反应堆堆芯出口

处堆内构件温度趋势表征的是堆芯出口氦气温度,可基本被认为是堆芯出口处氦气温度,而随堆芯出口氦气温度的升高,一回路氦气平均温度也会升高。一回路氦气平均温度的升高会带来一回路氦气中杂质在氦气中分压的减小,被吸附在堆芯石墨构件中的杂质会因为分压的减小而析出,所以,在实质上,一回路氦气中杂质水平的变化是随一回路氦气平均温度的变化而变化的。

表2中“—”处数据可认为低于气相色谱仪最低检测限。需强调的是,在氦气温度提升的过程中,氦气中杂质浓度的变化趋势是升高的,但就单个数据看,其变化有反复,这与气相色谱仪的取样方式导致的数据在某一范围

内变化有关系,在此不详细讨论。前两组数据中 $O_2$ 和 $N_2$ 数值偏高不可信,基本可认为是刚刚开启的取样系统管路中存有少量的空气所造成的,随着取样时间延长,取样管路中气氛趋于稳定, $O_2$ 和 $N_2$ 数值也趋于一稳定值。

表3为反应堆稳定在3.2 MW功率运行时的氦气品质数据。从表中可看出,杂质数据基本稳定。从理论上讲,如果没有新的杂质进入到反应堆一回路系统中,随着氦净化系统不断净化,杂质应呈减少趋势,但这是一相当漫长的过程,因实验反应堆在运行过程中应实验要求需要经常变换工况,所以,还未能收集到在一个功率水平上保持相当长一段时间且取样点不变的数据。

表3 反应堆稳定在3.2 MW功率运行时的氦气品质数据

Table 3 Helium gas qualities data of reactor power at 3.2 MW

时间 (2005年11月)	功率/kW	堆芯出口石墨 构件温度/°C	浓度/ppm						$H_2O$ 露点温度/°C
			$H_2$	$O_2$	$N_2$	$CH_4$	CO	$CO_2$	
9日19:01	3241	731.17	3.94	0.09	0.48	0.35	2.84	1.74	-76.3
10日19:06	3170	720.04	3.29	—	0.48	0.28	1.98	1.48	-76.3
11日20:26	3267	723.78	2.58	0.28	0.52	0.23	2.07	1.28	-77.0
12日19:58	3257	722.35	2.19	0.35	0.41	0.23	1.58	1.14	-77.5

表4为反应堆功率分别在3.2、6.6和7.2 MW时的数据。从表中可看出,反应堆功率水平越高,一回路氦气平均温度越高,氦气中杂质浓

度越高。比较功率为6.6和7.2 MW时的数据,虽然功率水平不同,但堆内构件的温度相同,所以,杂质的水平也基本一致。

表4 反应堆功率分别在3.2、6.6和7 MW时一回路氦气杂质浓度

Table 4 Concentration of helium gas impurities for primary system of reactor power at 3.2, 6.6 and 7 MW

功率/MW	堆芯出口石墨构件温度/°C	杂质浓度/ppm						$H_2O$ 露点温度/°C
		$H_2$	$O_2$	$N_2$	$CH_4$	CO	$CO_2$	
3.2	722.35	2.33	0.07	0.25	0.21	1.73	1.14	-76.9
6.6	770.92	3.57	0.11	0.56	0.3	2.05	1.58	-77.3
7.2	766.90	4.52	0.15	0.48	0.44	2.48	1.52	-80.5

图2示出在3 MW功率水平下切除氦净化系统140 h过程中一回路氦气品质变化。由图可见,在切除净化系统过程中, $H_2O$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CH_4$ 变化较为缓慢, $H_2$ 、CO、 $CO_2$ 数值逐步上升,初步判断,杂质的源项中有极微量的水以

极缓慢的速度漏入到一回路中,在高温下不以 $H_2O$ 的形式存在,而是生成 $H_2$ 、CO和 $CO_2$ 。

### 3 结论

1) HTR-10一回路氦气在反应堆功率运行过

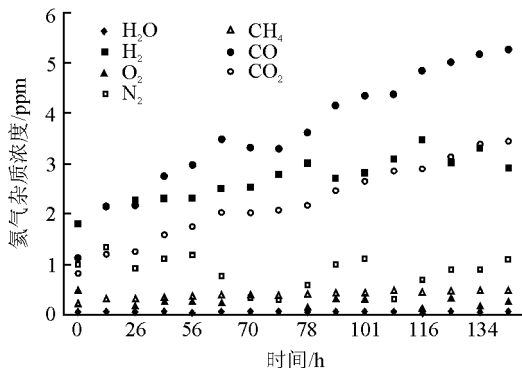


图2 切除氦净化系统后一回路氦气杂质浓度变化

Fig. 2 Concentrations of helium gas impurities for primary system after disconnecting helium purification system

程中经氦气净化系统净化后,杂质浓度数值稳定,氦气品质能够满足技术规格书要求;

2) 随着一回路氦气平均温度的升高,氦气品质呈下降趋势,但仍能满足技术规格书要求;

3) 可初步判断存在缓慢变化的杂质源项为水。

#### 参考文献:

- [1] 姚梅生, 吴莘馨, 翁锡镛, 等. 氦气试验回路中的氦净化[J]. 核动力工程, 1995, 16(5): 470-475. YAO Meisheng, WU Xinxin, WENG Ximei, et al. Purification of helium gas for the helium test loop[J]. Nuclear Power Engineering, 1995, 16(5): 470-475(in Chinese).
- [2] 廖翠萍, 郑振宏, 施福恩, 等. 高温气冷堆中 He 载气中 H<sub>2</sub> 和 CO 转化实验研究[J]. 原子能科学技术, 1995, 29(5): 441-447. LIAO Cuiping, ZHENG Zhenhong, SHI Fuen, et al. Study on the conversion of H<sub>2</sub> and CO from the helium carrier gas of high temperature[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1995, 29(5): 441-447(in Chinese).
- [3] 朱江, 王宇澄, 黄志勇, 等. 10 MW 高温气冷堆气体采样分析系统研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(1): 51-53. ZHU Jiang, WANG Yucheng, HUANG Zhiyong, et al. Helium sampling and analyzing system of 10 MW high temperature gas-cooled reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1): 51-53(in Chinese).