

中国先进研究堆氦气系统的设计

黄兴蓉

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:介绍了中国先进研究堆(CARR)氦气系统的方案调研、工艺流程设计、设备管道阀门布置设计和系统设计难点及特点。在系统布置设计中,采用 PDSOFT piping 配管软件建立该系统的三维模型,模型形象直观,既利于系统设计审查和修改,又利于现场安装工作。

关键词:重水研究堆;氦气系统;设计;建模

中图分类号:TL423

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2003)02-0121-03

Design of the Helium System of China Advanced Research Reactor

HUANG Xing-rong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-33, Beijing 102413, China)

Abstract: The scheme, flow design and arrangements of equipment, pipe, valve and the characteristic and technical difficulties of helium system of China advanced research reactor (CARR) are introduced in the paper. Using the PDSOFT piping software in the processing of system arrangement design, the three-dimensional system model is built up, which is convenient for design modification and examination and system field installation work.

Key words: heavy water research reactor; helium system; design; modelling

在用重水作冷却剂或慢化剂的核反应堆中,中子辐照引起重水分解生成氘和氧,并在重水自由液面上形成可燃氧混合气体,当它达到一定浓度后,有爆炸危险,因此,需在重水自由液面上加覆盖气体,并形成循环系统,以将爆炸气体带出。本工作对中国先进研究堆(CARR)重水覆盖气体氦气系统进行设计研究。

重水覆盖气体循环系统应确保系统中的爆炸性气体浓度在3%以下。为此,该系统应具有如下功能:1)载气能将重水箱及重水贮存罐的自由液面覆盖,并将重水辐解产生的爆炸性气体带出堆外并合成回收重水;2)必要时可向系统补充氧气,以确保氘与氧合成;3)能提供一定压力的气体用于将重水收集罐中的重水输送至重水贮存罐。氦气系统设计遵循《CARR氦气系统设计准则》。

1 系统功能及设计准则

CARR以重水作慢化剂,重水反射层最大热中子注量率为 $8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。设计要求

2 系统流程设计

系统的设计参数如下:反应堆核功率为

收稿日期:2002-05-27;修回日期:2002-09-26

作者简介:黄兴蓉(1968—),女,四川乐山人,工程师,化工机械专业

60 MW;爆炸性气体混合物生产率设计取值 $= 25 \text{ mL}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,其成份比 $V(\text{D}_2) : V(\text{O}_2) = 2 : 1$;系统中的爆炸性气体含量不大于 3% (以容积比计);系统中各组份气体的体积浓度保持在允许限值内,即 4% 氦、1% 氧、6% 氘;气体压力为 0.03 MPa;气体出入堆温度分别为 50 和 40 ;入堆气体流量为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

氦气系统主工艺流程示于图 1。

气体循环工艺流程如下:反应堆运行时,来自重水箱的带有爆炸性气体和重水蒸汽的氦气先进入重水贮存罐,接着进入冷凝器 A,然后,气体进入气液分离器,将气体中的重水水滴分离出;从气液分离器出来的气体进入合成室,在钚粉的催化作用下将爆炸性气体合成为重水;从合成室出来的氦气经瓷质过滤器滤掉钚粉后,进入冷凝器 B 再次冷凝;除去水汽后的氦气由鼓风机送往重水箱,进行再循环。

3 设计难点及特点

3.1 载气选择

在重水堆和轻水堆中,大部分研究堆采用氦气作为载气,也有的采用氮气,如欧共体的 Grenoble 堆、韩国的 HANARO 堆。氦气价格

低廉,渗透率低,可降低设备制造费用和系统运行费用,但氮气的存在将增高重水中的 NO_3^- 浓度,从而增大了对结构材料的腐蚀。CARR 的重水箱结构复杂,堆内不能完全充满重水,不能在堆外重水系统最高处设置一具有自由液面的膨胀容器,所以难以实现用氮气作载气。而氦气是惰性气体,中子活化和吸收截面很小,因此,循环气体中的放射性活度较低;氦气不与结构材料发生化学反应,且技术成熟;但氦气价格较高,渗透性强。从可行性、安全性和技术性等方面综合考虑,决定 CARR 采用氦气作为载气。

3.2 值的选取及系统流量的确定

是反应堆爆炸性气体产生率,它对系统设计至关重要,是决定系统流量的关键值,而系统流量大小又决定了系统的规模。

影响 值的因素很多,主要与堆功率、重水水质及温度等因素有关,其中,重水水质是最为关键的因素。目前,在国内尚未查到有关值的计算公式和计算程序,因此,只能根据经验和实际测定值来选取。某些研究堆的爆炸性气体产生率列于表 1。

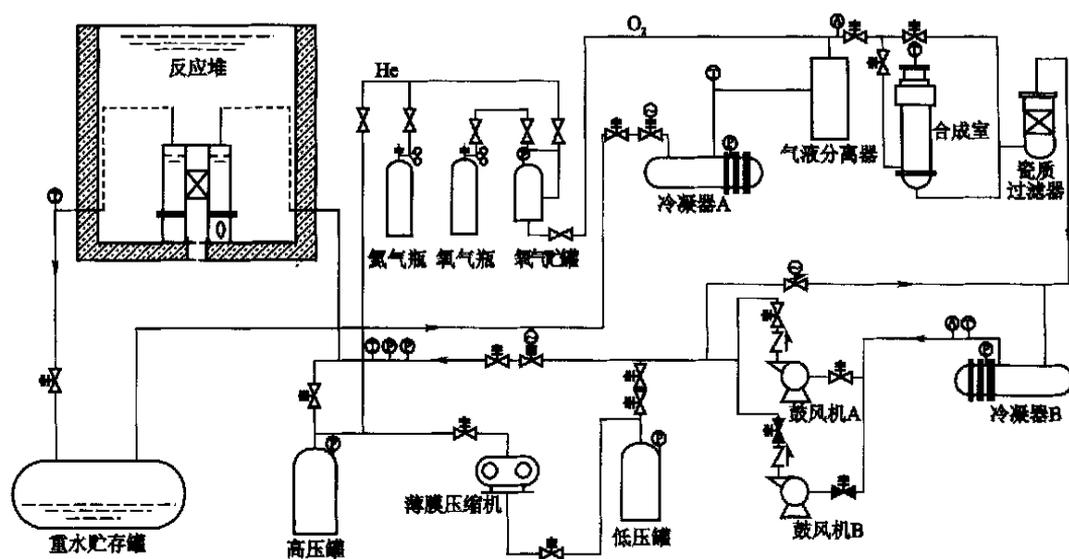


图 1 氦气系统主工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of helium system

表1 某些研究堆的爆炸性气体产生率
Table 1 Production rate of explosive gas for some research reactors

反应堆	堆功率/MW	重水水质条件			/(mL·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)		氦气流量/ (m ³ ·h ⁻¹)
		温度/	pD 值	电阻率/(Ω ·cm)	测定值	设计值	
NRX ^[1]	40	40	6.2	1 × 10 ⁶	0.34	20	22
EL1 ^[1]	0.15		4.0	8 × 10 ³	180		
			8.9	4.2 × 10 ⁵	< 1		
EL2 ^[1]	2.4			> 1 × 10 ⁵	< 15		
				9 × 10 ⁵	12		
CP-3 ^[1]	0.3			10 ⁴	300 ~ 500	> 1 000	10.2
				> 10 ⁶	1		
				2 × 10 ⁴	150		
JRR-2 ^[1]	10	47 ~ 55	7.1 ~ 7.7	1 × 10 ⁶	21	70	18
			6.9 ± 0.5	> 1 × 10 ⁶	9.5		
HWRR ^[1]	10		5.6	2.5 × 10 ⁴	10	400	133
			7.1	6.5 × 10 ⁴	18		
			7.2	1.02 × 10 ⁵	3.5		
CARR	60	45	5.5 ~ 6.5	> 5 × 10 ⁵	2.0	25	50

从表1可看出:重水电阻率越大,测量值越小。CARR正常运行时,重水电阻率控制在 $5 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上。用表1所列数据,内插推算测定值约为 $2.0 \text{ mL} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。参考我国重水研究堆HWRR的运行经验和法国ORPHEE堆的资料,认为该值是可信的。为留有裕量,CARR设计取值 $= 25 \text{ mL} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。据此,系统入堆气体流量设计值定为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

3.3 系统流体阻力计算

进行流体阻力计算的目如下:1) 确定系统中各流通管道及设备中流经的混合气体流量及组成;2) 确定气体回路的流体阻力,为鼓风机的选型提供依据。

所计算的流体为多组份流体,不同管段中的流体流量和组份是变化的。在计算氦气系统管道的流体阻力时,根据流量的变化,将系统管道划分为8个管段,按管段进行阻力计算,以得出各管段标准状态下各组份气体的体积流量。

系统的管道和设备阻力计算结果如下:系统管道的吸入管段阻力 $p_{\text{ent}} = 923 \text{ Pa}$,压出管段阻力 $p_{\text{out}} = 362 \text{ Pa}$,系统管道总阻力 $p_{\text{pipe}} = p_{\text{ent}} + p_{\text{out}} = 1285 \text{ Pa}$;系统设备总阻力 $p_{\text{equ}} = 617 \text{ Pa}$;氦气系统总阻力 $p_{\text{sys}} = p_{\text{pipe}} + p_{\text{equ}} = 1902 \text{ Pa}$ 。

3.4 系统设备和管道阀门的布置设计

系统的主要设备包括鼓风机、冷凝器、气液分离器、合成室、瓷质过滤器、高压罐、低压罐、薄膜压缩机及气瓶等,共13台。系统管线复杂,除主流管线外,次流管线有抽真空管线、重

水回收管线、补氢管线、补氧管线、重水收集罐的重水输送及氦气回收管线、二次冷却水管线等。系统共设置各种型式阀门52个。CARR工艺间氦气系统运行时的辐射水平很低,运行人员可以进入工艺间进行操作。系统中除设置3个电动阀门外,其余均采用就地手动阀门。系统与重水系统、真空系统、二次冷却水系统及工业循环系统设置接口,与土建、堆本体、电气和仪表等也设置相应接口。

为满足设备安装、操作和维修的可达性及工艺管道布置的最优化,在管道阀门的布置设计中,采用了PDSOFT piping配管软件,建立了系统三维模型。该模型直观、形象,既利于系统的设计审查和修改,又利于系统的现场安装。三维模型可生成二维平面图、立面图、ISO图、消隐图及渲染图等工程图纸。

4 结束语

本工作为CARR设计了氦气循环系统。该系统的设计为国内研究堆氦气系统设计积累了经验。

感谢黄道立、许汉铭、张文惠、李彦水和金华晋研究员对本工作的指导;感谢回路组全体同志对本工作的支持。

参考文献:

- [1] 仲言. 重水研究堆[J]. 北京:原子能出版社, 1988. 453 ~ 455.