

# 低温制冷技术在反应堆冷中子源系统中的应用研究

厉彦忠, 石 泳, 林明峰, 陈纯正, 冯全科, 束鹏程

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**基于国外有关冷中子源方面的资料,分析了近几年来国外冷中子源技术的应用与发展概况,并从技术上对采用不同慢化剂材料、制冷循环模式及冷却方法的系统进行分析与比较,指出了不同系统各自的优缺点。根据实际经验,归纳出建设冷中子源系统需解决的关键技术和问题,为我国下一步冷中子源系统的建设提供参考。

**关键词:**冷中子源;逆布雷顿循环;氦制冷

中图分类号:TL411

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2002)06-0519-04

## Application of Cryogenic Refrigerating Techniques in Cold Neutron Sources

LI Yan-zhong, SHI Yong, LIN Ming-feng,

CHEN Chur-zheng, FEN G Quan-ke, SHU Peng-cheng

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Based on many references of cold neutron sources (CNS) from all over the world, an analysis for the application and its development is done, and a comparison of various moderator fluids and phases, different refrigeration cycles and precooling methods are conducted. The cruxes of constructing a CNS are pointed out according to the experience in the paper.

**Key words:** cold neutron source; reverse-Brayton cycle; helium refrigeration

冷中子源(CNS)是实验研究堆中子散射实验设施的重要组成部分。反应堆堆芯通常在水平方向或垂直方向提供多种中子束供中子散射实验之用,其中有几路中子束需经过CNS系统的慢化处理,使速度降低,冷中子密度增加,从而获得具有高增益的冷中子束。为满足这一要求,CNS必须能提供足够的冷量,以平衡中子穿越冷包时的核发热及外界的辐射热。

CNS通常用氦作为慢化剂,吸收来自中子

束的核辐射和环境热辐射,在垂直方向形成循环,将热量传递给低温氦气。氦气将热传递来的热量通过压缩循环方式传向高温环境。因此,CNS由两个闭路循环系统,即慢化中子所需的氦循环系统和冷却氦所需的氦制冷循环系统所组成(图1)。图1中的1~14系指设计中的流程状态点。

中子按其能量 $E_n$ 的高低可分为:1)特快中子, $E_n > 10$  MeV;2)快中子, $0.5$  MeV  $< E_n$

收稿日期:2001-07-17;修回日期:2001-09-12

作者简介:厉彦忠(1958—),男,山东日照人,教授,博士生导师,制冷及低温工程专业

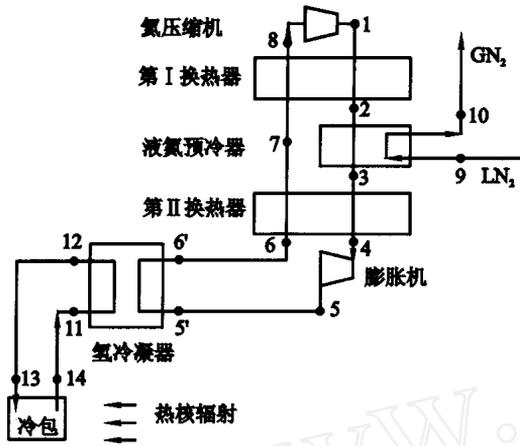


图1 冷中子源制冷流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cold neutron source

< 10 MeV; 3) 中能中子,  $1 \text{ keV} < E_n < 500 \text{ keV}$ ; 4) 慢中子,  $E_n < 1 \text{ keV}$ 。在低能范围内又分为热中子 ( $5 \text{ meV} < E_n < 100 \text{ meV}$ ) 和冷中子 ( $E_n < 5 \text{ meV}$ ), 而把  $E_n > 100 \text{ meV}$  的低能中子称为烫中子。反应堆中通常产生具有一定能级的热中子, 根据实验研究的需要, 经低温或高温处理, 得到所需的冷中子或烫中子。

### 1 国外 CNS 概况

世界上现有 20 余套 CNS, 主要建于 1985 ~ 1990 年间和 1995 年之后。CNS 的制冷功率从几十瓦至几千瓦, 在 100 ~ 1 000 W 内居多, 它所采用的慢化剂有氢、氘或氘氚混合物, 其中, 氢的应用最广。在国外不同的研究堆上有超临界氢循环、过冷液氢循环和两相氢循环 3 种类型。为获得较高的慢化剂密度, 采用液氢循环是有利的; 采用高压氢气实现慢化 (表 1), 需施加动力驱动, 这种循环无疑是稳定的, 但低温动力机的可靠性成为主要问题; 两相氢

循环是利用气液两相密度差而形成的自然循环形式, 可靠性高, 但其热稳定性取决于系统的传热工况、热力性质及结构特点。

国外 CNS 的相关主要参数列于表 2。

制冷系统通常采用氦气逆布雷顿 (Brayton) 循环或 Stirling 循环, 以逆 Brayton 循环为多, 制冷功率很小时方考虑采用 Stirling 循环。逆 Brayton 循环系统由等温压缩、等压放热、等熵膨胀和等压吸热 4 个过程组成, 分别由压缩机、膨胀机、换热器实现。目前, 循环系统的整体性能有了较大提高。为了提高系统运行可靠性, 压缩机与膨胀机带备用机的情况分别占 50% 及 35%。为防止意外停电事故, 采取了多种措施: 用氢储气罐的占 3%; 不间断电源占 7%; 飞轮储能占 3%。冷中子源的运行周期一般为 30 d。

冷源涉及的技术领域主要包括核物理、材料、控制和安全等, 低温技术是最主要的方面。正确合理地选择 CNS 系统的设计方案、确定慢化剂回路流动的基本模式、优化制冷系统流程等是需要认真考虑和解决的。

## 2 CNS 关键技术分析

### 2.1 冷包型式与材料

冷包是 CNS 系统中的关键部件, 它的形状、结构、材料和几何尺寸等对中子的慢化效果和核发热量有直接影响, 因此, 要求冷包薄壁、不变形、低发热和易更换。目前, 有能力设计制作冷包的国家不多, 我国建设 CNS 仍需借助国外力量制作冷包。现行使用的冷包主要有两种类型: 一种是行军壶状, 中空, 中子由边壁方向垂直穿过; 一种是圆柱状, 中间有支撑, 中子沿径向通过。后者适应于两路以上的中子束交叉通过的场合。冷包材料有铝镁合金、不锈钢, 现选用铝合金的居多。

表 1 3 种常用的氢循环回路主要参数

Table 1 Main parameters of three kinds of hydrogen circulation loop

回路类型	工作压力/ MPa	冷包工作温度/ K	介质密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	氢冷凝器温度/ K	制冷功率/ W	应用实例
过冷液氢 ( $\text{LH}_2$ )	0.158	17.6	73.1	22	1 500	KAERI: HANARO
超临界气氢 ( $\text{GH}_2$ )	1.50	18	67	21	2 200	ORNL: HFIR
气液两相氢 ( $\text{GH}_2\text{-LH}_2$ )	0.12	20	70.9	20	600	JAERI: JRR - 3M

表2 国外研究堆主要参数及冷中子源慢化剂回路特性<sup>[1~4]</sup>

Table 2 Main parameters of oversea research reactors and their CNSs

序号	反应堆	所在国	功率/MW	中子注量率 / (m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	冷包容积/L
1	HFR	法 Grenoble	57	6 × 10 <sup>18</sup>	25
2	HFBR	美 Brookhaven	60	3 × 10 <sup>18</sup>	1.35
3	ORPHEE	法 Saclay	14	3 × 10 <sup>18</sup>	0.8
4	FRJ2	德 Jülich	15	9 × 10 <sup>17</sup>	0.85
5	DR3	丹 Risø	10	7 × 10 <sup>17</sup>	0.57
6	FR2	德 Karlsruhe	43	5 × 10 <sup>17</sup>	0.25
7	EL3	法 Saclay	17	5 × 10 <sup>17</sup>	0.40
8	DIDO	奥 Harwell	15	4 × 10 <sup>17</sup>	0.20
9	Herald	Aldermaston	5	1 × 10 <sup>17</sup>	3
10	RRI	日 Kyoto	5		4
11	JRR-3M	日 JAERI	20	~ 10 <sup>14</sup>	0.8
12	KCNS	韩 HANARO	30		0.8
13	NBSR	美 NIST	20	2.7 × 10 <sup>13</sup>	30
14	FRM	德 M ünchen	4	2 × 10 <sup>13</sup>	0.9
15	FRM	德 M ünchen	20	4 × 10 <sup>14</sup>	20
16	HFIR	美 ORNL	100	4 × 10 <sup>19</sup>	

序号	冷包热负荷/W	制冷功率/W	慢化剂	循环型式	氢回路材料
1	5 000	10 000	LD <sub>2</sub>	两相热虹吸	Al/ Zircaloy
2	600		LH <sub>2</sub>	单相过冷	6061-T4 Al
3	500	700	LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	A286 (SS)
4	1 000		LH <sub>2</sub> + LD <sub>2</sub>	两相热虹吸	5052 Al
5	620		H <sub>2</sub>	单相超临界	5053-O Al
6	50		LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	
7	80		LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	5052 Al
8	40		LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	Magnesium
9	200		LH <sub>2</sub> + LD <sub>2</sub>	两相热虹吸	5056 Al
10	70		LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	5052 Al
11	900	1 360	LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	Sus 304L
12	1 000	1 500	LH <sub>2</sub>	两相热虹吸	Sus 304L
13	800		D <sub>2</sub> O/ H <sub>2</sub> O	固相冰	AZ31B Mg
14		400	LH <sub>2</sub> + LD <sub>2</sub>	两相热虹吸	AlMg
15		5 000	LH <sub>2</sub> + LD <sub>2</sub>	两相热虹吸	Zry
16	2 200	3 500	H <sub>2</sub>	单相超临界	

## 2.2 慢化剂的选择及其循环方式

对中子慢化效果最好的是氢,考虑到安全性也可用氘。选氢时,循环方式非常重要。采用过冷液氢应严格保证液氢温度处在沸点与凝固点之间,以免固化,并精确计算密度差以实现自循环。气氢必须附加动力装置驱动循环,流动稳定。两相氢循环的热动力较大,但冷包内易产生气泡而降低氢的密度,影响热稳定性和冷中子的产生效率。3种氢的循环实际中均有采用,但以两相氢的循环用得最多。

## 2.3 氢的安全问题

氢是一种极危险且难以处理的介质,氢气与空气混合时,氢气体积含量为4%~75.3%

时可自燃,甚至爆炸。氢气的渗透性非常强,很多金属都可被氢渗透,渗透到金属材料中的氢气会降低其机械性能。因此,氢回路的密封十分重要。另外,氢循环系统均在很低温度下工作,而系统的大部分传输管路处于室温水池中,管内外有近300K的温差,在管路结构设计中必须充分考虑热胀冷缩带来的变形影响。

## 2.4 氢流程方案选择

氢制冷系统的作用是把氢传递来的热核辐射热量转移到大气环境中,实现热量的逆向传递。由热力学第二定律可知:能量沿不可逆方向传递必须伴随着一种补偿(这里为电能的投入)。一般,在15K温度下,获得1kW冷量,

须投入约 150 倍电能,即驱动氦压机的电机功率至少为 150 kW。

氦流程虽普遍采用逆 Brayton 循环方式,但在流程布置上则有无液氮预冷、有无两级膨胀及系统状态参数不同设定方式等多种形式。液氮预冷流程具有高的运行可靠性,但系统复杂,投资大;两级膨胀的流程方案简便,但增加了设备,可靠性降低;基本型流程最简单,可靠性也高,但制冷性能系数低,运行费用高。系统参数则根据各设备单元性能优化而确定。

### 2.5 氦压机的密封与净化

氦气是渗透性很强的惰性气体。压缩机内的气体压力最高,氦气泄漏的可能性最大。控制压缩机氦气泄漏的关键在于轴封,即动密封技术。整机泄漏率应小于  $0.3 \text{ cm}^3/\text{s}$  (标准状态)。氦低温系统对氦气质量的要求很高。氦气的污染主要来自压缩机中的润滑油。经多级过滤可使氦气含油率达到小于  $0.003 \text{ mg}/\text{m}^3$  的要求。此外,过滤介质、滤床结构以及活性炭吸附滤芯对除油效果均有一定影响。

### 2.6 膨胀机的稳定性与可靠性

低温透平膨胀机具有高速和低温特点,它通过采用气体润滑技术确保轴承和转子的安全可靠运行。气体轴承具有金属部件之间无摩擦和低发热优点。然而,气体轴承和转子系统在高速下易产生涡动而失稳,设计时必须充分予以考虑。选择合适的轴承结构型式及结构参数对轴承工作稳定性至关重要。转子的动平衡同样是关键参数。因此,必须从设计、加工、装配等各方面予以严格保证。

气体轴承分静压型和动压型,前者需一套供气系统,工作过程中自始至终向轴承供气;后者依靠轴的运动形成气压悬浮转子,技术难度较大。目前,低温系统中较多采用静压型气体轴承。

### 2.7 测量与联动控制

自动监控系统起到保护 CNS 正常和安全工作的作用,主要表现在:1) 稳定冷包内液氢的温度(压力)、液位和自然循环,避免出现较大工况波动;2) 控制氦系统提供的氦气温度和流

量,保证足量液氢的产生,但应避免出现固化现象(控制氦气温度不低于  $14.5 \text{ K}$ );3) 当氦系统出现故障不能工作时,氦回路中的温度应控制不超过  $400 \text{ K}$ ,可考虑直接将冷氦气注入氦回路,以控制温度上升;4) 严格监测氦回路中的空气向真空层的泄漏和氦气对外(真空层、氦气中、大气)的泄漏,情况严重时,系统自动充氦气稀释空气和氦气成分,减少爆炸的可能性;5) CNS 某部分出现异常并导致整个系统无法工作时,控制系统能对反应堆系统连锁控制,实现紧急停机,避免发生重大事故。

氦制冷系统通常采用就地控制与集中控制相结合的控制方式,一些需要独立运行的单元设备,如压缩机、干燥器、稳压器、纯化器、膨胀机、真空泵等,均需单独设置控制系统,正常工作情况下自行调节。集中控制则完成各单元设备之间的匹配、变工况调节、紧急停机等,并实现与反应堆系统的联动。

## 3 结论

本工作在总结分析国外有关冷中子源资料的基础上,提出了一些关于设计建设冷中子源的基本思路以及需要注意和解决的关键技术和难题,为我国自行设计和建造研究堆冷中子源提供技术参考。

### 参考文献:

- [1] Kumat T, Suzuki M, Kakefuda K. The Cold Neutron Facility of the JRR-3M: JAERT-M92-028 [R]. Japan: JAERI, 1992.
- [2] Farnoux B, Maziere M. New Cold Neutron Sources of the ORPHEE Reactor [A]. Proceedings of the Symposium for ASRR-5 [C]. [s. l.]: [s. n.], 1999. 599 ~ 609.
- [3] Cho MS, Choi CO, Park KM. Technical Review for the Installation of CNS Facility at HANARO [A]. Proceedings of the Symposium for ASRR-5 [C]. [s. l.]: [s. n.], 1996. 610 ~ 618.
- [4] Alexander D. Materials for Cold Neutron Sources: Cryogenic and Irradiation Effects: LA-12146-C [R]. Los Alamos: LANL, 1990.