

摘 要

ITER 实验包层概念将是未来聚变反应堆实现氦自持、高热量提取并转化为电能的重要实验平台,同时也将为今后建造 DEMO 堆包层技术提供可靠的数据依据。ITER 作为发展聚变能源的一个重要实验平台,参与国都在该装置上进行相关的技术实验。为此,中国于 2004 年底向 TBWG 提交了《中国 ITER 固态实验包层模块(HC-SB TBM)的设计描述文件(简称 DDD 报告)》。目前,HC-SB TBM 的相关设计、技术研发正在执行中。在 ITER 运行的第一天,用于电磁性能测试的第一个实验包层模块(EM-TBM)也将在 ITER 上投入实验运行,为了验证中国 ITER-TBM 设计可靠性,需要建设一套符合设计要求和参数的高温氦气实验回路(High Temperature Helium Experiment Loop, HTHEL)来进行相关技术的实验。

本文在对国内外氦气实验回路调研的基础上,根据 TBM 设计实验的目标提出了高温/高压氦气实验回路的概念设计,分别对氦冷主回路系统、压力控制系统、水冷系统、氦气净化系统、数据采集与监控等系统的设计和各系统中的各关键部件的特性进行了描述。

回热器是回路中的关键部件。根据其气—气换热的特性,设计中采用高效紧凑的翅片式结构换热器,并对其进行了热力设计与数值分析,分析结果表明板束承受的热应力在许用范围之内。

本文选用专门的管道分析软件对关键管系应力情况以及管道对风机进出口管嘴的受力情况进行了计算、分析,并对管系的设计进行了改进,结果表明改进后的管系设计强度满足要求,其应力情况和对风机的影响均在允许范围内。

文中对回路的运行及安全进行了论证,文章最后总结了本文研究的主要内容,并对进一步的工作提出了建议。

本文的设计、计算、分析对今后的详细设计和工程设计具有一定的指导意义。

关键词：高温氦气实验回路 概念设计 回热器 管系 应力

Abstract

The tritium breeding blanket concept is a very important experiment platform in ITER, which will achieve tritium self-sufficiency and extract high-grade heat that will be translated into electricity. At the same time, it will offer reliable statistics in order to build blanket in the DEMO reactor. ITER, as an important experimental platform for developing fusion energy, will be used to conduct some relevant technical experiments by the participant countries. In this instance, China submitted the Design Description Document for the Chinese Helium Cooled Solid Breeder(CH HCSB)Test Blanket Module to TBWG in 2004. Now, all the relevant design and research about the HC-SB TBM is in progress. The first test blanket module for testing electromagnetic will launch into the experiment as soon as ITER running. Constructing a high temperature helium experimental loop is essential to insure the TBM's design credibility and operational safety.

On the base of domestic and abroad helium experimental loop design and running experiences, the conceptual of high temperature helium loop was designed, in which the main loop system, pressure control system, water cooled system, helium pure system and key components was presented.

Recuperator is an important component in the loop. It adopts finned heat exchanger according to the characteristic of the gas-to-gas heat exchanger, the thermal design and numeric analysis is also carried out.

The professional software is used to simulate and analyze the pipe's stress and force condition at the key part of the pipe and the junction of the pipe and circulator. According to the simulated results, the pipe design is reasonable; the condition of the stress and influence to circulator is allowable.

The operation and security of the loop is proved in the thesis, the main research is summarized and the suggestion for the next work in the last part is proposed.

The design, calculation and analysis in this thesis is valuable for the future further detailed design and practical engineering design.

Keywords: High temperature helium experimental loop Conceptual design
Recuperator Pipe Stress

Abstract

The tritium breeding blanket concept is a very important experiment platform in ITER, which will achieve tritium self-sufficiency and extract high-grade heat that will be translated into electricity. At the same time, it will offer reliable statistics in order to build blanket in the DEMO reactor. ITER, as an important experimental platform for developing fusion energy, will be used to conduct some relevant technical experiments by the participant countries. In this instance, China submitted the Design Description Document for the Chinese Helium Cooled Solid Breeder(CH HCSB)Test Blanket Module to TBWG in 2004. Now, all the relevant design and research about the HC-SB TBM is in progress. The first test blanket module for testing electromagnetic will launch into the experiment as soon as ITER running. Constructing a high temperature helium experimental loop is essential to insure the TBM's design credibility and operational safety.

On the base of domestic and abroad helium experimental loop design and running experiences, the conceptual of high temperature helium loop was designed, in which the main loop system, pressure control system, water cooled system, helium pure system and key components was presented.

Recuperator is an important component in the loop. It adopts finned heat exchanger according to the characteristic of the gas-to-gas heat exchanger, the thermal design and numeric analysis is also carried out.

The professional software is used to simulate and analyze the pipe's stress and force condition at the key part of the pipe and the junction of the pipe and circulator. According to the simulated results, the pipe design is reasonable; the condition of the stress and influence to circulator is allowable.

The operation and security of the loop is proved in the thesis, the main research is summarized and the suggestion for the next work in the last part is proposed.

The design, calculation and analysis in this thesis is valuable for the future further detailed design and practical engineering design.

Keywords: High temperature helium experimental loop Conceptual design
Recuperator Pipe Stress

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已标明引用的内容外，本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：马丽华

2008年05月06日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内 容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保 密 ， 在_____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 。

(请在以上方框内打“ ”)

学位论文作者签名：马丽华

指导教师签名：陈焕新

2008年05月06日

2008年05月06日

1 绪 论

1.1 研究背景

国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental reactor, ITER) 是具有 500MW 聚变功率、可持续燃烧 500s 的、世界上第一个热核聚变实验堆^[1] (其主机示意图^[2]见图 1.1), 由美苏首脑在 1985 年的日内瓦峰会上提出建造。此后在 ITER 工程设计活动 (EDA) 协议指导下, 经欧美日俄四方科学家与工程师的合作努力, 于 1998 年完成了 ITER 设计的全部任务, 预算为 100 亿美元。由于经济问题建造这个有预见性的装置在当时是无法实现的, 但在 ITER 设计过程中, 大力推动了托卡马克实验的进展, 因此尽管美国在 1998 年退出 ITER 计划, 欧日俄三方仍然致力于改进设计, 使之既满足修改的技术指标, 又要使经费减小到原来的 50%左右。新设计 ITER-FEAT (Fusion Energy Advanced Tokamak) 于 2001 年完成, 在维持 ITER 原有的主要目标的条件下, 经费要求降到约 46 亿美元, 预计建设期为 8~10 年, 运行期 20 年。2006 年 11 月 21 日, 中国、欧盟、日本、美国、俄罗斯、韩国、印度参与的七方在法国巴黎正式签署了《国际热核聚变实验堆 ITER (International Thermonuclear Experimental reactor) 联合实施协议》, 这标志着 ITER 计划实质上进入了正式执行阶段, 即将开始工程建设。

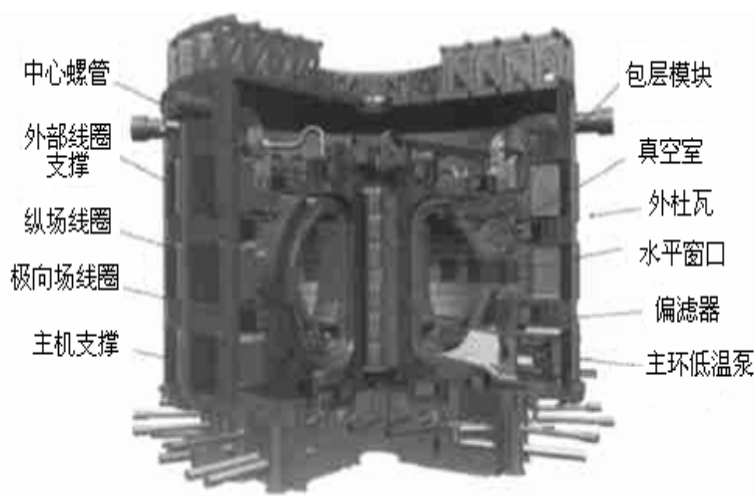


图 1.1 ITER 装置主机示意图

ITER 项目将集成当今国际受控磁约束核聚变研究的主要科学和技术成果，是首次实现能与未来实用聚变堆规模相比拟的受控热核聚变实验堆，其主要的工程技术目标：演示主要聚变技术的可用性和集成性，为将来的聚变堆试验部件，试验氦增殖模块（TBM）概念^[3]。ITER 目标的实现将为研究和发展用于示范聚变堆和商用聚变堆的各种技术奠定可靠的科学和技术基础。

ITER 包层分为屏蔽包层和实验包层两种，其中屏蔽包层主要用于装置的辐射防护，在已完成的 ITER-FEAT 设计中有较完善的包层设计和技术研发；实验包层模块（Test Blanket Module, TBM），主要用于对未来商用示范聚变堆（DEMO）产氦和能量获取技术进行实验，同时用于对设计工具、程序、数据等的验证和一定程度上对聚变堆材料进行综合测试。ITER 各参与方对 TBM 极为重视，都基于本国聚变能源发展战略和对聚变示范堆的定义提出了独立的 TBM 计划方案和实验计划，并对实验窗口及辅助系统得空间安排提出了各自的要求。各国提出的 TBM 设计方案主要集中在 5 个基本设计概念^[1]，见表 1.1。

表 1.1 5 种不同实验包层模块概念的基本特征

TBM 概念	冷却剂	氦增殖剂	中子倍增剂	结构材料
a. 氦冷/陶瓷	氦气	锂陶瓷	铍	铁素体钢
b. 氦冷/锂铅	氦冷/锂铅	液态锂铅	铅	铁素体钢
c. 水冷/陶瓷	水冷	锂陶瓷	铍	铁素体钢
d. 自冷/锂钒	自冷/锂	液态锂	-	钒基合金
e. 自冷/熔盐	自冷/熔盐	熔盐/FLiBe	铍	铁素体钢

若以增殖剂形态对 TBM 进行分类，a 和 c 可称为固态氦增殖剂包层概念，其余则归为液态氦增殖剂包层概念。固态氦增殖剂/氦冷/铁素体钢的概念采用氦气作冷却剂避免了液态金属冷却剂的磁流体动力学（MHD）压力降问题与液态金属冷却剂与材料的腐蚀问题，且固态氦增殖剂具有广泛的世界性的研发技术基础和实验数据，因此目前被认为是最有可能在未来的 DEMO 聚变堆包层设计中实现应用的概念。但固态氦增殖包层也存在缺点如：需增加铍作为中子倍增剂才能满足未来的聚变堆系统氦自持

的需要，系统排热管路的结构设计相对复杂，氦增殖区热工设计需满足一定的温度窗口（450~900℃）才有利于氦的释放和提取。我国基于国内长期的聚变-裂变混合堆的研究基础和我国聚变能发展的战略目标，选择了前两种 TBM 方案发展自己的实验包层技术，分别由国内核工业西南物理研究院和中国科学院等离子体物理研究所进行研究和设计。

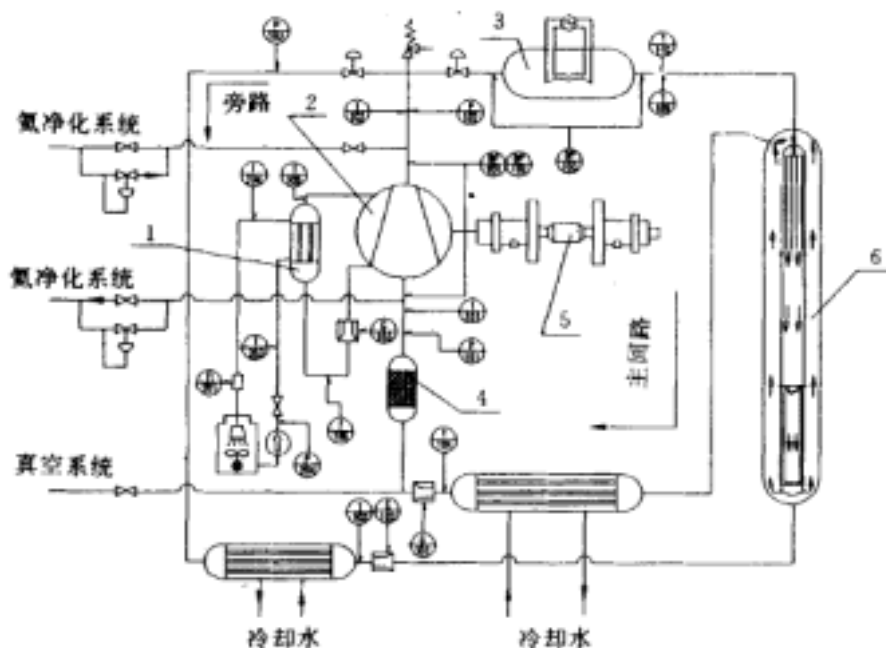
根据 ITER TBWG (Test Blanket Work Group) 的部署，核工业西南物理研究院在中国工程物理研究院和清华大学核能技术研究院等单位的协助下，于 2004 年完成了中国氦冷/锂陶瓷/低活化体素体钢 (CH HC-SB TBM) 概念的初步设计。在初步设计中，实验包层模块采用整体结构，冷却剂为氦气，压力 10MPa。氦增殖剂选用锂陶瓷的 Li_4SiO_4 球床结构，微球直径为 0.5~1mm。中子倍增剂采用铍，由 0.5mm 和 1mm 两种直径的微球构成球床结构^{[4][5][6]}。随后，为了提高实验模块的安全性、灵活性及对 ITER 界面和辅助系统的适应性，在初步设计的基础上将冷却剂压力由 10MPa 降低为 8MPa，原整体结构模块改为模块化结构，每个子模块有相对独立的冷却回路和载氦回路设计^[7]。中国提交的 CH HC-SB TBM 设计描述报告于 2005 年 11 月在北京召开的第 16 次 ITER 实验包层国际工作组会议上通过技术评价，从此，中国 ITER 固态实验包层计划进入第一个电磁模块 (EM-TBM) 的详细设计、工程设计及相关技术的研发阶段。

根据 TBWG 的要求，在 ITER 的不同运行阶段 (H-H、D-D、D-T) 将依次安放电磁模块 (EM-TBM)、热工水力模块 (NT-TBM)、氦增殖模块 (TM-TBM) 和整体综合性能模块 (PI-TBM) 进行试验，分别进行电磁性能测试、中子学和核性能测试、氦增殖性能和热工水力性能测试以及整体综合性能的测试，为确保 TBM 模块设计可靠与安全运行，在实验包层模块研制过程中和投入运行之前，要通过建造和运行一个高温/高压的氦实验回路对其进行各相关性能的实验验证。

1.2 国内外研究现状

上世纪 90 年代，我国设计建造了一座 10MW 高温气冷实验反应堆 (HTR-10) 作为发展模块式高温气冷堆堆型发展战略的第一步。为了在高温气冷堆条件下试验和验

证高温气冷堆的部件、氦气冷却剂技术及设备的性能和技术可行性，积累掌握设计、建造和运行氦气工程回路系统的技术和经验，清华大学核能技术设计院建成了—个中等规模的氦气工程试验回路（HETL）。HETL的主要设计参数为：压力4.0MPa，氦气流量300m³/h，加热和冷却能力为500kW。HETL由主回路系统和氦净化系统、真空系统、冷却水系统等组成，主要部件包括氦风机、中温电加热器、主冷却器、旁路冷却器、过滤器、调节阀等，该试验回路简图如图1.2^[8]所示。



1 冷却器； 2 氦气风机； 3 电加热器； 4 过滤器； 5 变频电源； 6 热气导管试验段

图 1.2 氦气试验回路（HETL）简图

风机是 HETL 中的关键设备之一，其作用是驱动氦气流过试验段或部件，完成各种热工水力学或部件性能的实验或考验，T2M 氦气循环风机是专门为该回路设计制造的，它是一台两级式涡轮氦气压缩循环机，入口压力 8.0MPa，出口压力 8.42MPa，入口温度 100℃，出口温度 116℃，额定流量 300m³/h，额定功率约 100kW，该风机采用覆盖式结构，压力壳可承受 10MPa 压力^[4]。回路中设气动调节阀，与风机转速配调，可使回路流量在 10%~100%范围内调节。回路中的冷却器均为管壳式，管内走氦气，壳侧为冷却水；中温加热器为管壳式，用 38mm×4 的 Incoloy800 管作为加热元件；

过滤器由多层不锈钢丝网构成可滤掉粒度 $0.3 \mu\text{m}$ 的固体颗粒^[9]。在设计建造回路过程中，发展了高温氦气的密封技术（如可装卸连接的密封、压力壳贯穿引电密封、热电偶压力壳贯穿密封技术等）^[10]，研究了氦气阀门和加压氦气参数测量工艺，设计了热气导管性能试验装置和中间换热器结构，并在工程规模上实现了氦气净化、取样和痕量杂质分析工艺^{[11][12][13]}，为 HTR-10 的建造运行提供了有力的依据。

国外目前运行的规模较大的氦气实验回路有欧洲 ENEA 的 HE-FUS3 根据欧洲 ITER 试验包层模块发展规划的框架，在 1992-1995 年间，ENEA 为了验证管道模型中 HCCB 增殖剂的热工机械设计的可靠性，需针对原型模块的子部件进行了一些非核测试实验，该实验将验证 DEMO 相关的设计结果，不同热膨胀引起的应力可以控制在可接受的范围内，不会导致结构疲劳破坏和超过允许的变形量。另外，实验也将对模型的相关部分进行缓慢的热疲劳效应和快速事故状态（如 LOCA, LOFA, 功率骤增）等热工水力方面测试。基于以上目的，ENEA 计划建造了一个新的氦气回路，即 HE-FUS3。1992 年底 ENEA 开始申请整个实验设施的经费支持，于 1993 年获得了该回路 45% 的设备经费，并命名为欧洲氦冷包层实验设施。该回路 1994 年 4 月开始建造，1995 年建成，最终的可行性测试于 1996 年完成。在 1995 年，ITER 实验包层概念的选择过程中，EURATOM 组织曾声称该设施将进行欧洲氦冷包层模块的热工机械性能测试，该模块是为 DEMO 设计，将在 ITER 上进行实验。HE-FUS3 采用 8 字形结构将回路分成两个不同的温度分区，实验测试部分温度比较高，压缩机进口温度较低，冷却器用于冷却压缩机进口温度使之降到最大可操作温度之下，该设施的参数^[14]如表 1.2 所示。

表 1.2 HE-FUS3 的参数

参数名称	参数值
设计压力	10.5 MPa
设计温度	530 °C
实验段出口温度	530 °C
压缩机进口温度	100 °C
压缩机氦气质量流率	0.05-0.35 kg/s

最大压缩比	16.000
最大压头	0.5 MPa
压缩机电机功率	110 kVA
电加热器功率	210 kW
回热器热流量	564 kW
空冷气热流量	280 kW
氦气储罐容积	3 m ³

1997 年 HE-FUS3 进行了热循环疲劳测试 ,该测试利用仿制的模型在温度 350~500 °C 的范围内 ,针对不同氦流率进行了几百次的循环试验。1998 年 HE-FUS3 又成功对 HCPB 包层模块进行了非常规状态 LOCA/LOFA 的事故测试 ,其测试结果与计算结果取得了很好的一致性。为了进行 TBM 模块全尺寸实验 ,该回路将进行升级 ,估计升级计划将于 2008 年开始实施^[15]。

为了进行 IFMIF(International Fusion Materials Irradiation Facility) ITER 和 DEMO 中部件的测试 ,欧洲已经开始在德国 Karlsruhe 建造高温高压氦气实验回路 ,为了满足各种测试条件的要求 ,将建设三个子回路 : HELOKA-Low Pressure for IFMIF/HFTM(HELOKA-LP)、 HELOKA-High Pressure for TBM (HELOKA-HP/TBM)和 HELOKA-High Pressure for TDM (HELOKA-TDM) and DEMO(HELOKA-HP/TDM+DEMO)。HELOKA 在不同使用要求下的正常操作条件见表 1.3^{[16][17]}。

表 1.3 HELOKA 不同使用要求下实验段参数

试验阶段	氦气质量流量 (kg/s)	压力 (MPa)	不同试验阶段的压 降 (MPa)	氦气进/ 出口 温度 (°C)	热功率供给 (MW)
ITER-TBM	0.88-1.8	8	<0.3	100 / 300 300 / 550	1.5
ITER-TDM	3.0 – 5.5	10	1.0	650 / 700	5
DEMO Blanket	5.0	8-9	<0.4	300 / 550	5
IFMIF-HFTM	0.083 – 1.5	0.3	0.05	50 / 80 - 100	0.12

HELOKA 实验的计划已经在 ITER、IFMIF 和 DEMO 以及每个实验部件的时间计划中分别加以强调，HELOKA 将以模块化方式建设，计划的第一个回路 HELOKA-HP/TBM 在 2005 年开始建造，预计将于 2008 年建成，该回路可以验证 TBM 的可行性、达到 ITER-TBM 氦冷系统的原型操作工况、提供在 ITER-TBM 要求的温度和压力条件下的实验数据以验证和改进进算结果。HELOKA-HP/TBM 可以进行试验的时候开始进行 TDM 回路的建设，为了在要求的温度和压力下测试小模块的 TDM，2009 年将对回路进行小规模升级，然后按照要求的质量流率和高密度通量建造 HELOKA-HP/TDM，全功率偏滤器实验预计在 2013 年开始进行。一旦 IFMIF 的工程和设计活动达成国际协议以及随后的共享部件也达成一致之后，HELOKA-LP 就开始建设，建设期预计一年。该回路将达到并保持 IFMIF 中所要求的温度和压力、提供测量数据以验证和改进计算结果并研究泵功减小事故结果等。

俄罗斯 Efremov 研究所与德国 FZK 合作完成了一个氦气实验回路的第一阶段建设，目前该回路可由隔膜泵提供 24g/s 的氦气流量，其诊断系统能够测量压力、质量流率、温度等 40 个以上的气体和实验模型参数。模块的热负荷可由电子束加热设备提供，27keV 的电子束能量可提供加热功率 60kW^[18]。目前该回路也完成了氦冷单指偏滤器模型的垂直目标实验，下阶段该回路采用涡轮泵驱动氦气，流量达到 600g/s，可给 ITER 实验包层模块提供冷负荷达 120kW^[19]。

1.3 论文研究内容与目标

综上所述，高温氦试验回路对于验证 TBM 模块在 ITER 上的实验可行性，评价 TBM 模块的设计规范和设计软件的可靠性，尤其是验证在 TBM 模块冷却通道中的氦气流速分布和热传导的合理性等是非常必要的，同时也可以为将来示范堆的包层设计、验证提供实验条件。本论文在对国内外氦实验回路调研的基础上，提出了我国建设高温氦气实验回路的概念设计。

本文的主要研究有：

- (1) 对国内外氦气实验回路进行调研；
- (2) 提出高温氦气实验回路的设计目标和设计要求；
- (3) 借鉴国内外氦气实验回路设计经验，提出高温氦气实验回路的概念设计；
- (4) 对回路中回热器和关键管系进行设计，并通过计算机模拟分析验证设计的可靠性。

论文的研究目标是：

- (1) 了解国内外氦气实验回路的设计及运行情况；
- (2) 根据高温氦气实验回路的设计目标和要求进行回路的概念设计；
- (3) 积累回路概念设计、部件设计以及模拟分析的经验，为详细设计和工程设计提供依据。

2 高温氦气实验回路概念设计

2.1 设计目标及要求

2.1.1 设计目标

在 ITER 运行的各个阶段，要安放不同的 TBM 实验模块，依次进行电磁、热工水力、氦增殖和整体性能实验。TBM 模块在 ITER 装置上运行之前，建设一个符合参数要求的氦气实验回路对其进行相关性能测试实验是必需的，实验回路的设计目标主要包括以下几个方面：

(1) 氦气实验回路要能模拟聚变实验堆一回路流动传热特性，验证 TBM 设计的热工水力参数、部件（包括球床技术等）的热工、机械性能；也可为将来的示范聚变堆 DEMO 包层设计提供实验条件；

(2) 能够进行针对 TBM 子部件的实验，包括：测量背板中氦气流动的分布，第一壁的换热系数，侧板的压力载荷及变形，检验子模块的制造技术，测量包层外壳的热工应力等，子部件实验完毕后，还将对 TBM 缩小模块直到 1:1 原型模块进行实验。

(3) TBM 的几何结构非常复杂，并处于 ITER 要求的高压力和高温度条件下，按照 ITER TBM 实验计划，对 TBM 模型进行整体性能的测试是不可缺少的环节。

(4) 验证氦气实验回路中的各关键部件性能，如风机、热交换器、加热器等，掌握建造、运行氦回路系统的技术和积累经验，评估 ITER 氦冷系统设计和工艺的技术可行性与系统可靠性，同时氦气实验回路还要求能对一回路重要辅助系统进行测试，包括氦气净化系统，压力控制系统等。

(5) 通过回路的试运行了解和分析各种运行状态，并初步掌握回路操作的一般准则，为 ITER 氦气冷却回路建设提供参考和依据；同时对 ITER 运行过程中可能出现的异常情况，（如 LOCA, LOFA 等）进行评估。

2.1.2 实验回路的设计要求

氦气实验回路的主要设计目标是针对 ITER TBM 的热工水力和部分综合性能的

实验，因此氦气实验回路必须有足够能力使得 ITER CH HCSB TBM 实验包层达到其设计参数。按照 ITER 运行要求，TBM 总热沉积 0.76MW，结构材料为铁素体钢，最高允许温度为 530℃；氦气压力 8MPa，进出口温度分别为 300/500℃。满足 TBM 的设计参数是氦气实验回路最主要的要求，除此之外还需要满足真空、结构、热工水力、机械、电源、制造、组装、测试及控制组装、材料组装、规划等方面的要求。

真空要求：氦气实验回路部分实验运行过程中，氦气处于高温高压状态，过量的泄漏可能对操作人员或部分设备造成危害，而且氦气制造价格昂贵，氦气的泄漏也会造成较大的经济损失，因此氦气实验回路的防泄漏措施必须满足要求，整个氦气实验回路系统的总泄漏率必须小于 $10^{-5}\text{Pa m}^3/\text{s}$ 。回路中的主要部件在安装前后都必须经过高温和常温下的泄漏率测试，并推测其可能要进行的完善工作。材料、设计、表面处理等必须与 TBM 和 TBM 氦气冷却系统相一致。

结构要求：氦气实验回路设计需要满足常规压力和事故工况下的 ITER 结构设计准则。氦回路常规工况压力为 8MPa，事故工况下平均系统压力将减小，但局部压力可能大于 8MPa。

热工水力：氦气实验回路满足模拟聚变实验堆一回路功能，能够将各种工况下回路中模拟 TBM、电加热器等部件产生的热量转移出来，并保证 TBM 各部件温度在允许范围内。氦气最高温度为 500℃，结构材料最高温度为 550℃^[20]，氦增殖材料最高温度为 920℃^[21]，Be 增殖区最高温度为 650℃^[22]，氦气实验回路中氦风机进口温度保持在 100 以下。

组装要求：回路的所有部件包括氦-水换热器，氦-氦换热器，风机，加热器，过滤器，气罐以及阀门等功能单元，这些设备将在工厂中制造完成。对回路的焊接处需要表面和内部检测，测量耐压和泄漏情况。完成回路的泄漏检测后，将绝热层安装在回路上以减少热损失，同时也加强了日常维护与检修的安全性，加强了结构的强度。

空间要求：ITER 实验包层的氦气冷却系统对空间的要求很严格，氦气实验回路在满足其功能之外应尽可能的减小回路所占用的空间，以为 CH HCSB TBM 氦气冷却系统的建设提供改进经验和依据。

运行要求：氦气实验回路的运行必须按照一定的规则进行，以满足 TBM 相关实

验及安全要求的需要。回路中所有测量及操作都通过传感器和控制元件引导至控制室，操作人员只需在控制室中即可完成实验所需的操作。氦气实验回路的稳定运行周期要足够长，足以满足 ITER-TBM 实验的要求。

安全要求：氦气实验回路的的目的之一即是模拟 ITER TBM 氦气冷却系统，因此氦气实验回路的运行必须满足 ITER TBM 系统的一般安全要求和环境安全要求。氦气实验回路的运行要保证在正常工况下氦气泄漏量在允许范围内，对控制室不造成影响；在事故工况下回路能够通过有效措施保持回路完整性，对操作人员不造成危害。

2.2 概念设计

HTHEL 实验回路的设计应满足安装在 ITER 上的 TBM 冷却系统模拟要求：温度和压力分布与 TBM 运行时所希望达到的参数相同；对回路部件与安装技术要求整个系统的泄漏率小于 $10^{-5} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。在正常运行条件下，回路能运行足够长的时间，能够达到 ITER 运行周期要求。另外，也可能模拟异常的事故情况（LOCA，LOFA）以便确定适当的控制方法。根据需要，实验段参数设计见表 2.1^[23]。

表 2.1 HTHEL 实验段设计参数

实验段	质量流量 (kg/s)	压 力 (Mpa)	压力损失 (Mpa)	氦气进出口温度 ()	加热功率 (MW)
TBM	0.1 ~ 1	8	<0.3	100/300 300/500	1
DEMO 包 层	4	8	<0.4	300/500	5

HTHEL 实验回路主要由氦气冷却主回路系统、压力控制系统、净化系统和水冷系统及相应的测量与监控系统组成，其原理图如图 2.1 所示。

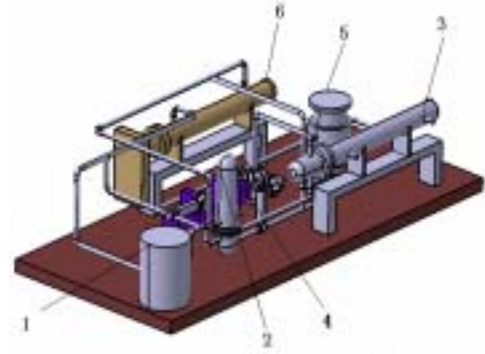
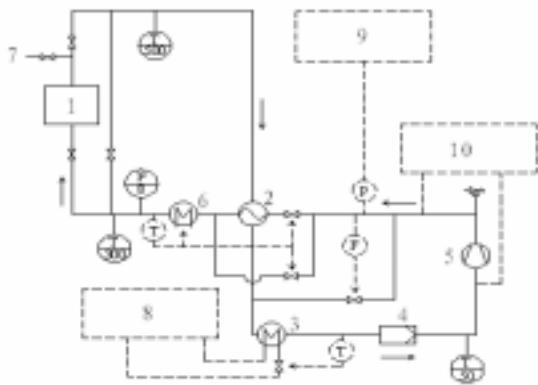


图 2.1 HTHEL 实验回路原理图 图 2.2 氦冷主回路三维布置图示意图

1 - 实验段 2 - 回热器 3 - 冷却器 4 - 过滤器 5 - 风机 6 - 电加热器 7 - 真空泵 8 - 水冷系统 9 - 压力控制系统 10 - 净化系统

2.2.1 主回路设计

氦气主回路主要由氦风机、电加热器、主冷却器、过滤器、调节阀、安全阀和管道等组成，主回路的原理图及三维布置示意图，分别见图 2.1 和图 2.2。该回路设计为一个“8”字型结构^[24]，分为热管段和冷管段，氦气由位于冷管段的风机驱动，大部分进入主回路中的回热器，并有少量氦气通过旁路到达回热器下游调节 TBM 进口温度不至过高。回热器为一氦-氦换热器，热管段通过它将部分热量传给冷管段，不但降低了电加热器所需功率，同时减小氦-水换热器中氦气与冷却水传热温差，降低由于温差产生的应力。回热器下游安装有电加热器，当回热器出口温度达不到 TBM 入口温度要求时，通过它加热氦气以达到实验温度要求。氦气从 TBM 出来经过回热器后进入冷管段，再经过氦-水换热器将氦气温度冷却到风机要求的工作温度后流回风机。风机出口的小部分氦气进入氦气净化系统，由净化系统除去杂质后再回到风机入口，风机的出口段连接有氦气贮存与压力调节系统。

氦气实验主回路中各设备处于高温高压条件下，在易发生泄漏的部位，如管道与管道、设备、阀门等之间的连接处，在完成组装后都应进行焊接密封。回路中的关键部件，如风机、电加热器、实验段中的加热部件等的电源线密封设计，采用不同形式的静密封贯穿件结构，这一结构在技术上比较成熟，能够满足高温高压氦气实验回路密封性能要求。

2.2.2 压力控制系统设计

ITER TBM 设计的运行压力为 8MPa ,最大压力为 10MPa ,为满足 TBM 运行要求 ,氦气实验回路也相应的需要控制回路压力在实验要求的范围内 ,这通过压力控制系统来实现。压力控制系统是对回路氦气的供给、回收、压力控制以及过压保护的重要设备。它主要担负着以下功能 :

(1) 回路系统在稳态运行时 ,各种扰动因素会使氦气温度和压力发生变化 ,如少量泄漏。在封闭的回路系统内任何温度和容积的变化都会影响到压力 ,如果压力过高 ,会危及设备的安全 ,压力过低则不能达到实验预期的效果。因此 ,压力控制系统能够使回路压力波动限制在很小的范围内。

(2) 在变工况运行时 ,氦气温度分布及密度都会随着状态的变动而变化 ,使氦气收缩或膨胀 ,会造成回路的压力波动。压力控制系统通过补充或抽出部分氦气以控制压力波动在较小的范围内。当预期实验完成 ,回路中的氦气能够部分或完全贮存于压力控制系统的设备中。

(3) 当出现事故时 ,会引起回路压力急剧升高或回路平均压力降低但局部压力升高的情况 ,压力控制系统的安全阀能够提供过压保护。

压力控制系统的主要作用是主回路氦气的供给、回收、压力控制以及过压保护等 ,部件都是常规部件且除容器罐外尺寸均较小。回路正常运行时 ,压力控制系统几乎与主回路是隔绝的 ,但是 ,当主回路改变运行状态、有少量氦气泄漏或发生冷却剂丧失事故 ,压力控制系统就会通过氦气的回收与释放来调节主回路的压力。

压力控制系统连接于主回路氦气风机出口段 ,其优点在于 :一是此处氦气温度较低 ,约为 100 ,便于氦气的贮存和释放 ,不需要压力控制系统加热额外的设备来控制温度 ;二是在氦气出口段对回路压力进行控制 ,作用更有效 ,更快捷。

该回路要求可以保持主回路正常工况 8MPa 的稳定压力 ,而且储罐要可储存回路系统所要求的氦气总量以便在实验运行前达到给主回路充气、加压的目的 ,同时考虑到主回路部件的维修 ,压力控制系统需能给主回路降压并在维修阶段回收所有的氦气。根据这些要求 ,压力控制系统设计原理如图 2.3 所示。

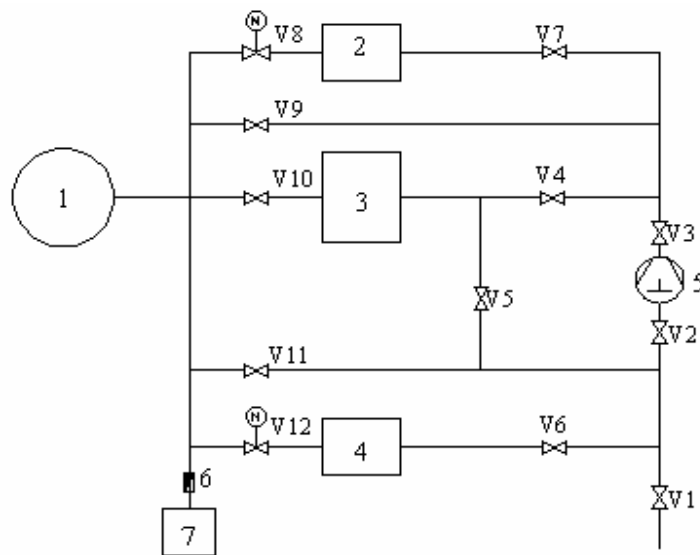


图 2.3 氦气供给和压力控制回路

- 1 - 氦冷主回路 2 - 源罐 3 - 储罐 4 - 缓冲罐 5 - 压缩机
6 - 安全阀 7 - 贮罐

压力控制系统包括源罐、贮存罐、缓冲罐、压缩机、压力调节阀和管道等。储罐能够存储整个回路需要的氦气，另外包括 10% 的余量。在给主回路加压之前，开启阀门 V1 外部氦源通过氦压缩机将整个主回路及压力控制系统各压力罐和管道中所需的氦气充入储罐，然后关闭阀门 V1，通过压缩机和阀门控制，实现回路的氦气供给、回收、把缓冲罐的氦气压入源罐来维持缓冲罐的低压和源罐的高压。当回路压力增大超过压力调节阀（V12）设定值（ $<1.5\text{MPa}$ ）时，阀门开启，主回路氦气进入低压的缓冲罐，当主回路压力低于压力调节阀（V8）设定值（ 11MPa ）时，阀门开启，源罐的高压氦气进入主回路。

过压保护方面，回路上设有备用的安全阀，阀门出口接在一个低压（ 0.1MPa ）的贮罐上。当主回路压力超过设定值，压力调节阀（V12）出现故障不能开启时，安全阀开启，将主回路氦气排入气罐，这样就避免了高温高压的氦气进入环境可能造成的危害，也避免了当安全阀不能正常关闭时引起的回路的完全失压。

2.2.3 水冷系统设计

ITER 采用水冷回路作为冷却系统的第二回路，它的主要功能是带走 ITER 各实验

阶段由等离子体热辐射及中子在 TBM 中的作用产生的热沉积。而在氦气实验回路中，水冷回路需要带走回路中各种实验条件下产生的多余热量，也包括回路完全模拟 ITER 条件下的冷却功能，同时还提供回路中各主要设备（如电加热器等）的设备冷却水。

氦气实验回路运行过程中，主回路中的氦气风机要求工作于较低温度条件下，必须经回热器冷却过的氦气再次进行冷却。在氦气实验回路进行的部分实验中，如模拟 ITER 运行实验状态下，冷却器氦气入口温度达到 300℃，而出口温度需冷却到 50℃左右，所需冷却功率较大，在实验不同阶段，氦气进口温度在 100℃~350℃之间，出口温度为 50℃，所以在冷却器二回路采用水冷回路。

水冷回路位于氦气风机的入口段，包括空冷塔、水泵、手动调节阀、电动阀以及压力表和温度计等（如图 2.4），该系统为主回路的换热器及电加热器等设备提供冷却水，通过调节水泵旁路来改变换热器的水流量，起到控制主回路氦气温度的作用。在此回路中，除氦-水换热器在主回路室外，其余部分都布置于主回路室外，其中空冷塔直接处于大气环境中。在水泵的入口段连接有一个小型的蓄水池，供给整个回路的冷却用水。冷却回路最大冷却能力为 1.5MW，管道选用 DN50，壁厚 3.5 毫米的普通钢管，管内流速根据运行工况变化（1~6.2m/s），最大质量流量约 9kg/s，换热器冷却水进、出口温度分别为 35℃和 75℃。整个冷却水回路与氦气回路连接部分采用了盘管式换热器，避免了氦气和水的接触，因此冷却水回路不需要采用特殊的处理。冷却水回路中的主要设备：水泵、阀门、过滤器、空冷塔都是容易获得的常规设备。

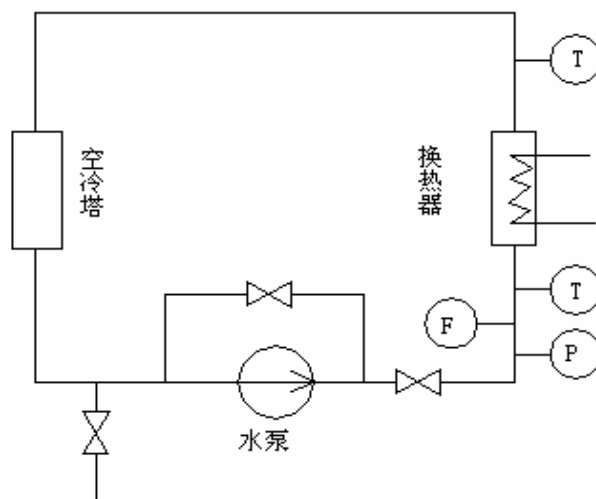


图 2.4 水冷回路原理图

2.2.4 氦气净化系统设计^{[25][26]}

为了减少结构材料的腐蚀，确保回路中的氦气纯度并验证聚变实验堆中的氦净化工艺，在氦气实验回路中设置了氦净化系统，并验证其可行性和主要工艺。

氦回路中杂质的来源有：初装氦气中的其它气体；回路充氦前，容器和管道内壁、结构材料吸附的气体^[13]；热交换器水侧往氦气侧的渗漏等。主要杂质有 H_2 、 H_2O 、 O_2 、 CO_2 等。为去除氦中过量的这些杂质，设置了可连续运行的主要由氧化铜床和分子筛床组成的氦净化系统，以确保回路中，特别是高温试验段中氦的杂质的含量低于 ITER—TBM 冷却回路的设计许可值。

氦净化系统的进出口管道分别与主回路氦气风机出口和进口段相连，利用氦气风机产生的压头将部分氦气送入净化系统。氦回路的氦净化系统如图 2.5 所示，由它由电加热器、氧化铜床、氦气压缩机、分子筛床、热交换器、真空泵、气体在线取样分析、多组阀门和管道等组成。

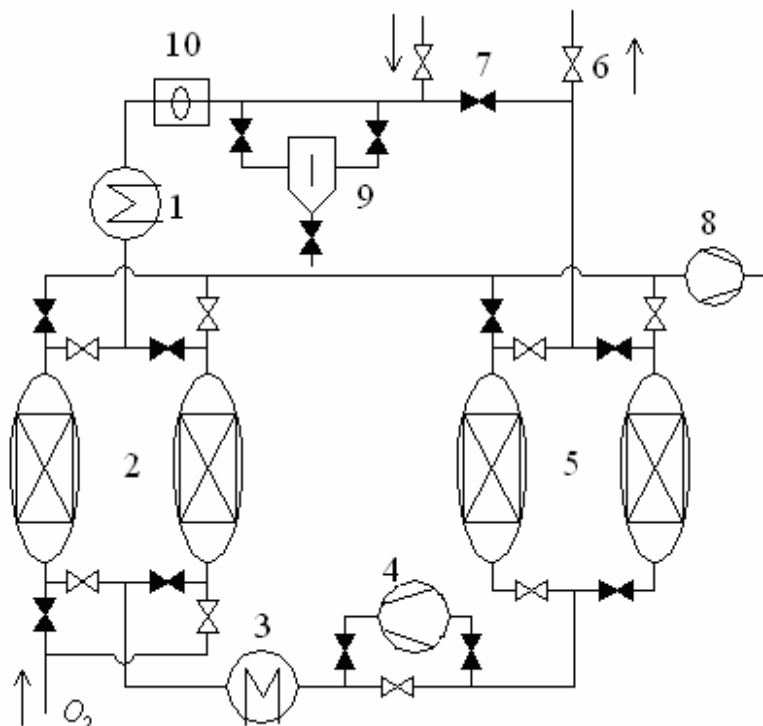


图 2.5 净化回路流程图

- 1 - 电加热器 2 - 氧化铜床 3 - 换热器 4 - 压缩机 5 - 分子筛床 6 - 开阀门 7 - 闭阀门
8 - 真空泵 9 - 汽水分离器 10 - 流量控制器

该系统主要用于去除冷却剂氦气中的 H_2 、 O_2 、水、 CO_2 等气体杂质。利用主回路风机提供的驱动压头将小部分氦气送入净化系统，经电加热器加热到 300 ，高温氦气流入氧化铜床，将 H_2 氧化成水。从氧化铜床出来的氦气经换热器温度降至室温，再经分子筛床吸附水等气体杂质，净化后的氦气重新回到主回路。

2.2.5 数据采集与监控系统^[27]

氦气实验回路数据采集与监控系统是完成预期各类实验的保证，回路设计的实验类型众多，回路运行的工况各异，都需要通过数据采集和监控系统实现其运行状态。

氦气实验回路建设的目的是完成 TBM 和部件在 ITER 运行条件下的各种热工水力特性实验，以及验证相关辅助系统的功能，这要求氦气实验回路能够运行在 HCSB TBM 所设计的状态下，数据采集和监控系统即通过其中的测量数据与计算机设计的程序完成对回路中阀门、风机、电源等设备的调节以达到相关的实验状态。

数据采集与监控系统主要由两部分组成，一部分是位于控制室内的计算机系统，另一部分是位于氦气实验回路主回路及水冷回路等辅助系统多个位置的参数测量装置和控制系统。对氦气实验回路的操作主要是在主控室内完成，这样可以避免操作人员与高温高压回路部件接触的机会，增加氦气回路操作的安全性。同时由于 ITER 运行期间，氦气冷却回路也是由计算机控制操作，这也为 ITER HCSB TBM 运行积累技术和经验。

氦气实验回路数据采集与监控系统由压力测量装置、温度测量装置、流量计、数模转换器、计算机等组成。该系统可自动采集数据对回路进行监控，在事故工况下自动保护回路的安全。数据采集系统以数据采集控制单元为核心，配以多种附属模块插件，完成不同的测控任务，并通过接口同计算机相连，构成完整的数据采集监控系统，系统组成见图 2.6。

氦回路参数测量中的共同问题是传感器安装结构中的氦气密封问题，为减少可能的泄漏，分别采取了有效的措施。回路氦气测温用铠装热电偶组件上过渡管的两端与铠装热电偶套管的连接为激光焊接，焊缝经气压实验和氦气泄漏率实验，其泄漏率小于 $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$ ，保证承压和密封的高可靠性要求。

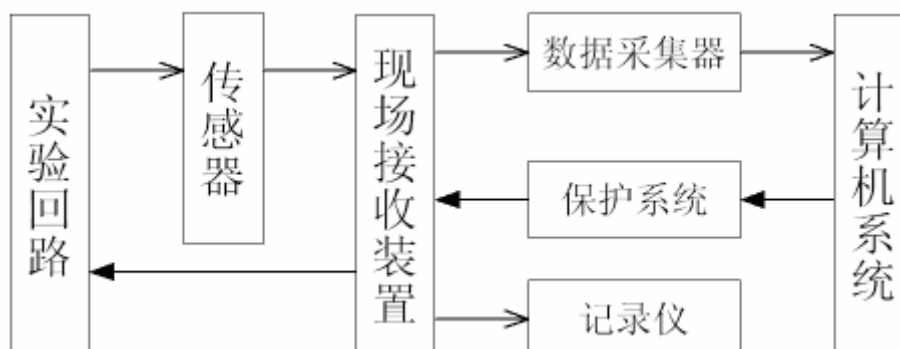


图 2.6 数据采集与监控系统组成示意图

氦回路操作与监控系统独立安装于控制室，通过数据采集卡及数据线连接计算机和参数测量装置和控制设备。控制室放置有控制台、计算机等设备，约需空间 12m²。

2.3 系统部件描述

2.3.1 主回路中关键部件描述

(1) 氦-水换热器

氦-水换热器位于冷管段风机入口端，其作用是将回热器流出的氦气温度进一步降低到风机的允许工作温度。

氦-水换热器拟采用盘管式换热器，高压氦气走管侧，低压水走壳侧。冷却水进口温度为 35℃，出口温度约为 75℃。采用盘管作为传热管道的优点是它能够在很大程度上减小由高温氦气引起的热应力。氦-水换热器的主要参数如表 2.2 所示。

表 2.2 氦-水换热器主要参数

参数	单位	规定的运行状态下
类型		盘管式
数量		1
管尺寸 (外/内直径)	mm	15/12
管长	m	25
管的个数		15
管束直径 × 长度	m	0.3×2.0

氦-水换热器直径 × 长度	m	0.35×3.0
冷却功率	MW	1
第一冷却剂		氦气
压力	MPa	8
进/出口温度	°C	300/(50~100)
质量流量	kg/s	~1
压力损失	Pa	~13000
对流换热系数	W/(m ² K)	960~1,200
第二冷却剂		水
压力	MPa	<1
进/出口温度	°C	35/75
质量流量	kg/s	6.0~8.0
对流换热系数	W/(m ² K)	8,000~11,000

氦-水换热器内的管应力主要是由温度引起的。氦-水换热器的氦气入口处温度最高，应力也最大，换热器设计时需要的对此处用软件进行应力分析。氦-水换热器内的管道示意图如图 2.7 所示。

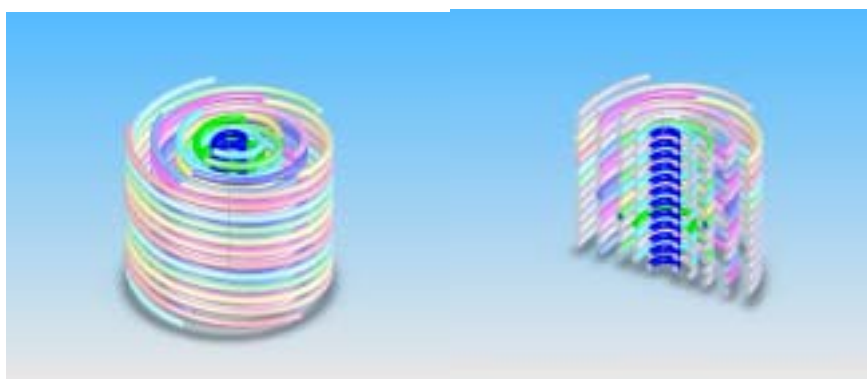


图 2.7 氦-水换热器内的管道

(2) 氦-氦换热器

氦-氦换热器也即回热器，它位于氦气实验回路热管段和冷管段之间，其作用是将 TBM 出口段的高温氦气做部分冷却，同时加热由风机驱动的冷管段氦气。主要运行

在热备用阶段和全运行、部件实验阶段，能够把热管段 500（或 300）的氦气冷却到 300（或 100），同时把冷管段的氦气从 100 加热到约 300。回路安装回热器的优点在于它降低了电加热器所需功率的条件下提高了 TBM 入口温度，同时降低氦-水换热器中的氦气与二回路冷却水的温差，减小材料的热应力。

回热器拟采用板翅式换热器，该结构形式的换热器具有传热效率高、紧凑、轻巧、适应性强等优点。回热器的主要参数如表 2.3 所示。

表 2.3 回热器主要参数

参数	单位	规定的运行状态下
类型		板翅式
数量		1
板翅尺寸 (高度/厚度/间距.)	mm	6.5/0.5/4.2
有效宽度	mm	360
隔板厚度	mm	1.2
管束长度	mm	600
冷却功率	MW	1
第一冷却剂		氦气
压力	MPa	8
进/出口温度	°C	500/300
质量流量	kg/s	~1
压力损失	Pa	800~3000
对流换热系数	W/(m ² K)	1000~1800
第二冷却剂		氦气
压力	MPa	8
进/出口温度	°C	100/300
质量流量	kg/s	1
对流换热系数	W/(m ² K)	1000~1800

该换热器介质流动方式采用逆流式，如图2.8所示，冷热通道采用间隔排列。

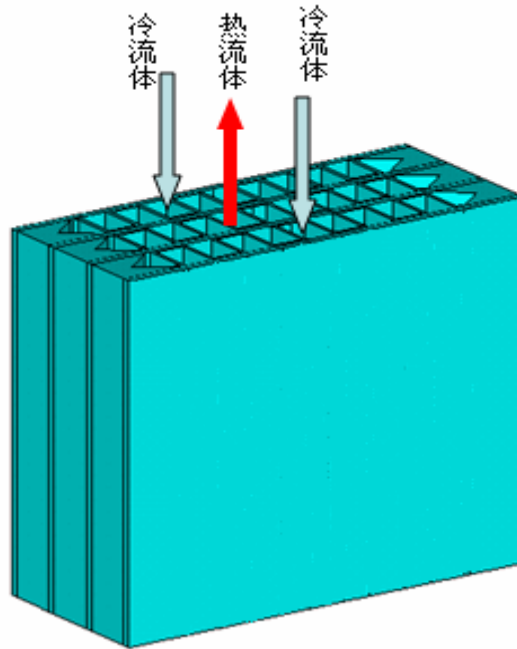


图2.8 板翅式换热器流道布置方式

(3) 风机

氦风机是高温高压氦气实验回路上装备的唯一高速运转的装置，安装于冷管段上，作用是驱动氦气流过被试验的实验段或部件，完成各种热工水力学或部件性能的实验或考验。由于这些被测试验件将用在 ITER-TBM 冷却回路里，氦气实验回路应能模拟 TBM 冷却回路，氦气循环风机也应满足这一要求。

回路中氦风机设计要求如下：

- 入口压力 8MPa，出口压力 8.36MPa。为了过压控制，另外保留 10%的余量。
- 设计温度 50℃，出口温度限制在 100℃，额定流量 1.3kg/s，流量可调，假定风机效率 0.8,额定功耗约 100kW。
- 额定转速 5000rpm，最大转速 6000rpm，调速范围达到最大转速/最小转速至少大于 3。

氦风机拟采用双级、离心和全封闭卧式结构的氦气压缩循环机，该风机具备如下特点：

- (1) 全封闭式结构，不存在动密封

风机采用置入式电机，将电机定子固定在压力壳上，电机两个出轴端各悬两级叶轮直接拖动，电机的转子与风机轴一体化，驱动电机全部浸在氦气里，可以得到充分冷却，不会出现电流过载等问题，整个风机不存在动密封的困难。

为了克服动密封这一困难，绝大多数氦气循环风机都做成覆盖式，将动密封转移为电源和信号线的静密封，而静密封贯穿件技术上较成熟^[28]。电机的电源线与风机内各种测量信号线采用耐压玻璃将引线熔铸于金属管内做成贯穿件^[29]，再用密封件将其固定在压力壳上，密封件可采用氟橡胶“O”型环。

(2) 磁力轴承

轴承是主回路氦气风机的主要技术关键。滚动轴承高速时寿命低，往往达不到要求，滑动轴承则必须解决足够的润滑油储备和油或油蒸气可能进入主回路的问题。气动轴承可以从根本上解决了这一问题，但它要求的转速很高，因而技术要求高，比较容易出问题。磁力轴承转速高、寿命长、无摩擦磨损且不需要润滑，是目前最先进方案。

(3) 两级叶轮对称布置，减少轴向推力

风机采用涡轮式结构，将两个尺寸相同的叶轮对称布置在轴的两端。这样在整机结构上采用两级叶轮对称布置，使轴向推力减少到最小程度，使风机的径向尺寸变小。

(4) 抽气冷却

采用这种冷却方式可以避免冷却水进入压力壳内，风机内气体摩擦和电机电磁发热所产生的热量由流过风机内部的氦气带到风机外的氦-水冷却器带走。

(5) 变频调速

对于氦风机而言，有多种调速方式可供选择，通过变频器调速为无级调速，调速效果好，因此氦实验回路选择变频器输入电动机可变频率交流电。

目前国外运行的高温高压氦气实验回路 HETL、HE-FUS 和核工业西南物理研究院拟建氦回路风机参数如表 2.4 所示。

表 2.4 国内外主要氦回路风机参数比较

	HETL	HE-FUS	西物院拟建氦回路
工作压力(MPa)	4.0	8.0	8-10
质量流量(kg/s)	0.86	1.35	1.3
风机参数			
台数	1	1	1
工作温度()	100	<100	50-100
驱动功率(kW)	100	110	100
立式/卧式	卧式	立式	立式
叶轮形式	双级离心式	单级离心式	双级离心式
驱动动力	电机	电机	电机
轴承形式	气动轴承	油脂润滑结构	电磁轴承
压力升(kPa)	420	500	396
转速(r/min)	空载近似 15000	5000	空载近似 15000

(4) 电加热器

氦气电加热器是氦气实验回路中的关键设备，用来把一定流量的氦气加热到实验段所需的温度，包括烘烤 TBM 第一壁，加热整个回路氦气到运行温度，控制实验段入口温度。电加热器加热功率根据回路的运行工况而变化。

电加热器的设计要满足多项要求：电加热器采用电阻式，故加热元件的结构要满足一定的电阻值，使得在确定的电压下达到所要求的功率值；电加热器要组织好流道，满足流动和传热要求，使得发出的热量能被氦气及时带走，使氦气达到所需的高温而加热元件的温度不致高过允许的值；电加热器的外壳要能承受设计压力，引电部件要有良好的密封和绝缘性能；加热器内部结构要承受高温和热膨胀及要有必要的隔热保温等。

电加热器为管壳式，卧式，加热管并列排放，最大功率为 1MW，加热元件用 Incoloy-800 管，与普通奥氏体不锈钢相比具有较好的抗氧化性能、耐腐蚀和高温

蠕变强度。

(5) 过滤器

过滤器安装在回路的冷管段上，用于吸收管道及部件因制造、侵蚀、摩擦而产生的灰尘，灰尘直径大于 10^{-6}m 甚至更小的均会被吸收。过滤器由网状小直径的过滤管组成的一个直径 0.35m、长 3.0m 的可拆卸的过滤筒构成。滤芯采用不锈钢纤维烧结毡，该材料由金属纤维棉网经高温烧结而成，它强度高、结构稳定，抗腐蚀性好，耐高压，经烧结后的烧结毡能连续保持过滤网布的过滤作用，且具有三维网状，多孔结构，孔隙率高，表面积大，孔径小，分布均匀等特点，有效克服了金属网易堵、易损的缺陷，解决了滤纸、滤布不耐高温、不耐高压的问题，是理想的耐高温、耐腐蚀、高精度的过滤材料。过滤器壳内氦气体积大约 0.29m^3 ，压力损失低于 10000Pa。

(6) 管道

主回路管道采用内直径 100mm、外直径 115mm 的标准化管道，材料为奥氏体不锈钢，在外层安装 10-15cm 厚的无机材料（硅酸盐）保温层以减少热损失，同时也加强了日常维护与检修的安全性，加强了结构的强度，并且设计时保证足够的安全余量。因为实验回路管道相对较短，且流通面积大，在整个回路压力损失中所占比例很小，小于 10%。在管道布置的设计中，考虑了一些工程技术问题，如 U 形连接来降低长管道的热膨胀应力。

(7) 阀门

阀门是回路中的关键部件，对于保证回路系统的稳定运行以及改变回路的运行状态有非常重要的作用。作为 TBM 冷却剂的氦气具备了化学上的惰性、良好的核性能、较好的传热和载热特性等优点，但是氦气同时具有很强的渗透性，而氦气本身价格昂贵，使氦气阀门的设计制造具有一定的难度。因此，氦气阀门最重要的要求是：动作可靠、密封性能好、强度高、操作方便等^[30]。对阀门有以下要求：

寿命长、可靠性高：因氦气的渗透性很强，为了避免泄露，氦气阀门与管道的连接方式均采用焊接结构，损坏后难以作整体更换，这要求阀门在使用期间内一直能安全可靠地工作。

材料的要求：为了确保回路中氦气的纯度，阀门与介质接触的零部件要具有良好

的抗腐蚀性能。氦气阀门的阀体材料采用不锈钢，其毛坯使用不锈钢锻件，这些锻件需使用超声波，着色或磁粉探伤等方式对其性能进行测试，以满足氦回路氦气阀门对材料的要求。

良好的密封性能：如果回路中的阀门发生外泄漏，不仅会影响回路正常运行，而且将造成经济上的浪费。由于氦气的强渗透性，对氦气阀门的密封设计提出了很高的要求。

表面光滑，清洁度高：为减少杂质的积聚，阀门与介质接触面要光滑。为避免介质通过阀门时带入脏物，影响回路中氦气的质量，要对阀门进行严格的清洗，风干，并在清洁间里装配，管口接头处加保护盖，用清洁的聚乙烯塑料袋封装内置干燥剂以满足阀门清洁度的要求^[31]。

远距离操作：部分阀门所处系统的位置，在回路运行过程中操作人员难以接近，故要求电动、电磁等进行远距离操作，以确保回路的正常安全运行。

氦气实验回路中的阀门根据其作用可以主要有：安全阀、调节阀、截止阀、止回阀等。阀门的数量保持最少以减少异常的开启或关闭而引起的压力损失甚至事故的发生。阀门的大小必须与管道的尺寸相匹配，采用波纹管密封。实验段两侧及实验段旁路的阀门只起开关作用，可采用截止阀。

氦气安全阀安装在冷管段与压力控制调节系统相连，主要功能是在主回路系统达到压力设计限值时，通过安全阀排出部分氦气，防止回路的压力超过设计限值，保证主回路压力边界的完整性。

为了检验阀门产品的设计及加工质量须对其基本性能如强度性能、密封性能、流动阻力、动作性能、使用寿命等进行测试。其中强度性能是指阀门承受截止压力的能力可由水压试验测试；密封性能是指阀门个密封部位组织截止泄漏的能力，可用气泡法和氦检漏方法检验；阀门对介质的流动阻力用介质流过阀门的压力损失表示；阀门的动作性能包括启闭力和启闭力矩、启闭速度、动作灵敏度和可靠性有专门的功能试验系统测定；使用寿命表示阀门的耐用程度通常以保证密封要求的启闭次数或使用时间表示。

2.3.2 压力控制系统主要部件描述

储罐 储罐要求可以储存整个氨冷主回路和压力控制系统中所需的氨气量，当外部氨源除去后可向氨气主回路的部件及压力控制系统中的其他部件和管道充入氨气。

缓冲罐 缓冲罐的压力低于主回路中的压力，当主回路中压力升高达到阀门 V12 设置的开启值时，主回路中的氨气流入缓冲罐，以保持压力平衡。

源罐 源罐中的压力高于主回路压力，当氨冷主回路中压力降低时，阀门 V8 自动开启，源罐中的氨气流入主回路以保证主回路中压力稳定。当源罐中的压力低于某设定值时，缓冲罐的部分氨气则通过风机压入源罐。

贮罐 当主回路压力超过设定值，压力调节阀（V12）出现故障不能开启时，安全阀开启，将主回路氨气排入气罐，既避免了高温高压的氨气进入环境可能造成的危害，又避免了当电磁阀不能正常关闭时引起的回路的完全失压。

氨风机 氨风机可驱动氨气完成向储罐、源罐及氨冷主回路中的充气过程，并在氨气回收过程中将回路中氨气压入储罐。

2.3.3 水冷系统主要部件描述

水泵 水泵的作用是将水冷系统中的水加压到换热器所需要的压力并保证系统的正常循环，根据要求拟选用型号为 IS80-50-315A 离心泵，额定流量为 $30\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 128m，转速 2900r/min，电机功率 37kW，效率为 41%。

冷却塔 冷却塔将从换热器出来的 75 的热水冷却到 35，拟采用喷流式冷却塔，从换热器出来的 75 的热水通过压力喷嘴喷向塔内，成为散开的喷流体，同时将大量空气带入塔内，热水通过蒸发和接触传热将热量传给空气，冷却后的水落入集水池，空气通过收水器后排出，这种冷却塔没有风机噪声。

2.3.4 净化系统主要部件描述^[32]

氧化铜床 氧化铜床为固定式催化反应器，内装高效脱氧复合催化剂（其活性成分为金属钨）和高比表面积的氧化铜催化剂，主要用于除去氨气中的 H_2 和 O_2 等气体杂质。氧化铜床的工作原理是：在高效脱氧复合催化剂的催化作用下， H_2 和 O_2 发生反应生

成水。余下的 H_2 与高活性的 CuO 反应生成水，同时 CuO 被还原成 Cu 。经一段时间的运行后，氧化铜床中大部分 CuO 被还原成 Cu 而降低或失去净化功能，需补充氧气再重新生成 CuO 。

分子筛床 分子筛床为固定床吸附器，内装高活性的 5A 分子筛及电加热管，主要用于吸收氦气中的水和 CO_2 等杂质。其工作原理是：利用 5A 分子筛在常温对水、 CO_2 等吸附容量大的特点，将上述杂质吸附在分子筛中。在分子筛吸附饱和后，可采用提高再生气体温度的方法实现 5A 分子筛的再生。

气体质量流量控制器：气体质量流量控制器用于显示和控制系统的工作流量，其测量和控制范围为 $0 \sim 3 \text{ L/s}$ ，外形尺寸为 $(L \times W \times H) 200\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 。

气体加热器：采用电加热方式，功率 1.5 kW ，热交换面积 1m^2 ，气体流量 450 mg/s ，气体出口温度为 573K 。外形尺寸为 $(D \times H) 200\text{mm} \times 500\text{mm}$ 。

真空泵：采用涡旋式无油真空泵，泵抽速 8L/s ，极限真空 0.1Pa 。外形尺寸为 $(L \times W \times H) 700\text{mm} \times 450\text{mm} \times 400\text{mm}$ 。该种泵已在工业领域使用，可通过商业采购获得。

2.3.5 数据采集与监控系统主要部件描述

测压元件 氦气系统的压力采用 Foxboro 841 系列散硅压力变送器测量，压差用 Foxboro 扩散硅式压差变送器测量。

流量计 氦气主回路和旁路流量各采用一支国际标准 $1/4$ 椭圆喷嘴进行测量，氦风机冷却回路的氦流量采用标准角接取压孔板测量。

测温元件 用镍铬--镍硅 K 型铠装热电偶和 Pt100 铂电阻，分别用于高温和低温测量。高可靠性铠装热电偶测温装置主要用于测量高压高温氦气回路中冷却剂氦气多个位置的温度以及待测部件温度。选用分度号为 K 型 $(\text{NiCr}2\text{NiAl})$ 的铠装热电偶，其直径为 3.17mm ，套管材料为 316L，壁厚为 0.4 mm ，绝缘材料为 MgO ，测量端为绝缘型结构。

湿度计：可在线测量氦中微量水分，结果以露点温度、湿度、绝对湿度或水蒸汽分压等形式显示，湿度测量范围为 $0.014 \sim 25000\text{cm}^3/\text{m}^3$ 。湿度传感器与系统被测管道相接，被测氦气经传感器后排往大气，这样虽然损失部分氦气，却省掉了循环装置。测量前

传感器和测量室要充分抽真空，为得到真实反映流过氦气中水含量的信号，要求被测氦气流过测量室的时间足够长。湿度测量装置原理图如图 2.9 所示^[13]。

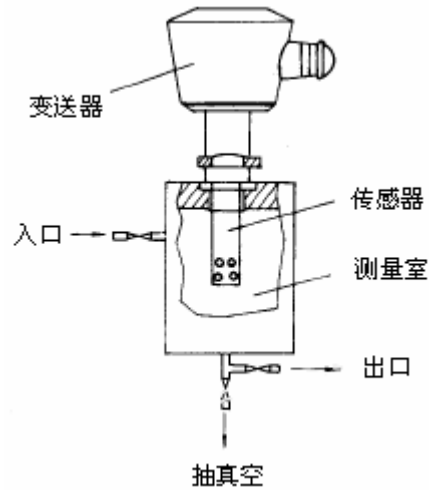


图 2.9 湿度测量装置

气相色谱仪：气体通过缓冲罐降压、冷却器冷却后进入气相色谱仪，色谱仪采用热导和氦离子化检测器，最低测量浓度为 1 ppm，可分析氦同位素气体和高纯气体的杂质成份。

3 回热器热力设计与数值模拟

3.1 回热器参数描述与选型依据

回热器把热管段 500 的氦气冷却到 300 ,同时把冷管段的氦气从 100 加热到 300 。压力 8Mpa,压力降需小于 3500Pa。因为回热器里的热流体和冷流体都是氦气,所以紧凑、传热效率高且适应性强的板翅式热交换器是适用的。根据国外文献报道,现在钎焊工艺生产的不锈钢板翅式换热器产品的耐温和耐压极限已达到 850 及 14.0MPa^{[33][34]}。

3.2 回热器热力计算及结果^[35]

1. 热流量 Q

$$Q=W_s C_{p,s} T_s \dots\dots\dots (3.1)$$

式中 Q——热流量, kW ;

W_s ——热流体的质量流量, kg/s ;

$C_{p,s}$ ——热流体的定压比热, kJ/(kg*K) ;

T_s ——热流体侧的传热温差, K。

2. 冷管段氦气流量 W_t

$$W_t=Q/C_{p,t} T_t \dots\dots\dots (3.2)$$

式中 W_s ——冷流体的质量流量, kg/s ;

$C_{p,t}$ ——冷流体的定压比热, kJ/(kg*K)

T_t ——冷流体侧的传热温差, K

该设计中质量流量为 1 kg/s ,热流体侧温差为 200K ,由式 3.1 和式 3.2 计算可得热流量为 1037.6kW ,冷流体质量流量为 1.0004 kg/s

3. 流体的平均温度 T_m 和 t_m

因给热系数公式要求,要用流体的平均温度:

$$T_m=0.5 (T_i +T_o) \dots\dots\dots (3.3)$$

式中 T_m ——流体的平均温度，

T_i ——流体进口温度，

T_o ——流体出口温度，

由式 3.3 计算可得冷热流体的平均温度分别为 200 和 400 。

4. 平均温度下的物性数据

$T_m=400$ 时，氦气的物性数据：

动力粘度 $\mu=0.0000344 \text{ kg/m-s}=0.12384 \text{ kg/m-h}$

密度 $=5.64 \text{ kg/m}^3$

导热系数 $=0.2688 \text{ W/m-K}$

定压比热容 $C_p=5.188 \text{ kJ/kg-K}$

普朗特数 $Pr=0.6639$

$t_m=200$ 时，氦气的物性数据：

动力粘度 $\mu=0.00002747 \text{ kg/m-s}=0.0989 \text{ kg/m-h}$

密度 $=7.966 \text{ kg/m}^3$

导热系数 $=0.2146 \text{ W/m-K}$

定压比热容 $C_p=5.186 \text{ kJ/kg-K}$

普朗特数 $Pr=0.664$

5. 传热表面特性 对温差比较大的情况，宜选用平直形翅片，通道为逆流布置，采用的结构参数及相应的参数计算见表 3.1 和表 3.2。

表 3.1 结构参数

名称	参数
翅片高度 h, mm	6.5
翅片厚度 δ, mm	0.5
翅片间距 b, mm	4.2
有效宽度 B_e, mm	360
隔板厚度 δ_3, mm	1.2
翅片、隔板材料	奥氏体不锈钢

表 3.2 翅片结构参数计算

名称	计算公式	数值
翅片内距 x, mm	$x=b-\delta$	3.7
翅片内高 y, mm	$y=h-$	6.0
当量直径 D_e, m	$D_e = \frac{2xy}{x+y}$	4.57×10^{-3}
每层通道截面积 f_i (有效宽度 $B_e=1\text{m}$ 时), m^2	$f_i = \frac{xyB_e}{b}$	5.28×10^{-3}
每层通道传热面积 F_i (有效宽度 B_e 和有效长度 L_e 均为 1m 时), m^2	$F_i = \frac{2(x+y)B_eL_e}{b}$	4.62
每层通道一次传热面积 F_{i1}, m^2	$F_{i1} = \frac{x}{x+y} F_i$	1.76
每层通道二次传热面积 F_{i2}, m^2	$F_{i2} = \frac{y}{x+y} F_i$	2.86
二次传热面积占总传热面积的比 例 F_{i2}/F_i	$F_{i2}/F_i = \frac{y}{x+y}$	0.62
高温侧通道数与低温侧通道数之 比		1:1
翅片定性尺寸 l, m		热端 $l=h/2=3.25 \times 10^{-3}$ 冷端 $l=h/2=3.25 \times 10^{-3}$

6. 物理参数 物理参数根据介质的平均温度和平均压力查取 参见表 3.3。

表 3.3 物理参数

名称	高温侧	低温侧
流体平均温度 t_f	400	200
导热系数 λ , W/(m·°C)	0.2688	0.2146
动力粘度 μ , Pa·s	0.0000344	0.00002747
定压比热容 C_p , kJ/(kg·°C)	5.188	5.186
密度 ρ , kg/m ³	5.64 入口 4.921 出口 6.604	7.966

7.翅片材料的导热系数

$$\lambda_f = 21.4 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$$

8.给热系数计算参见表 3.4

表 3.4 给热系数计算

名称	计算公式	高温侧	低温侧
假设质量流速 G , kg/(s·m ²)		55	55
Re	$Re = \frac{D_e G}{\mu}$	7307	9150
传热因子 j	查图得	0.0037	0.0034
摩擦因子 f	查图得	0.0098	0.0092
Pr	$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda}$	0.6639	0.664
$Pr^{2/3}$		0.761	0.761
Stanton 准数 S_t	$S_t = j / Pr^{2/3}$	0.00486	0.00468
给热系数 a , W/(m ² ·°C)	$a = S_t C_p G$	1388	1335
污垢系数 r , m ² ·°C / W		0	0
总给热系数 a' ,	$1/a' = r + 1/a$	1388	1335

9.翅片效率和表面效率，见表 3.5

3.5 翅片效率和表面效率计算

名称	计算公式	高温侧	低温侧
翅片参数 P, m^{-1}	$P = \sqrt{\frac{2a'}{\lambda_f \delta}}$	143.72	157.75
Pl		0.467	0.513
$\text{Tanh}(pl)$	查表 6-20 (利用内插法)	0.4358	0.4723
翅片效率 η_f	$\eta_f = \frac{\text{tanh}(Pl)}{Pl}$	0.933	0.921
表面效率 η_0	$\eta_0 = 1 - \frac{F_2}{F}(1 - \eta_f)$	0.958	0.951

10.传热系数

以高温侧传热面积为基准

$$K_h = \frac{1}{\frac{1}{a_h \eta_{oh}} + \frac{1}{a_c \eta_{oc}} \frac{F_{ih}}{F_{ic}}} \dots\dots\dots (3.4)$$

式中 K_h ——以高温侧传热面积为基准的传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；
 a_h ——高温侧给热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；
 η_{oh} ——高温侧翅片表面效率；
 F_{ih} ——热流体侧每条通道传热面积， m^2 ；
 F_{ic} ——冷流体侧每条通道传热面积， m^2 。

以低温侧传热面积为基准

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{a_c \eta_{oc}} + \frac{1}{a_h \eta_{oh}} \frac{F_{ic}}{F_{ih}}} \dots\dots\dots (3.5)$$

式中 K_c ——以低温侧传热面积为基准的传热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；
 a_c ——低温侧给热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；
 η_{oc} ——低温侧翅片表面效率。

由式 3.4 和式 3.5 计算可得以高温侧和以低温侧为基准的传热系数均为 649.47

W/(m²·)。

11.回热器的平均温差

回热器平均温差计算公式及结果见表 3.6.

表 3.6 回热器平均温差计算公式及结果

名称	计算公式	数值
冷端温差 t_h ,	$t_{hi}-t_{co}$	200
热端温差 t_h ,	$t_{ho}-t_{ci}$	200
平均温差 t_m ,	$(t_h + t_c)/2$	200

12.通道排数、理论传热面积与长度的计算公式及结果如表 3.7 所示^[34]

表 3.7 通道排数、理论传热面积与长度

名称	计算公式	高温侧	低温侧
通道排数	$\frac{W}{GB_e f}$	10	11
理论传热面积, m ²	$\frac{Q}{k\Delta t_m}$	7.99	7.99
理论长度, m	$\frac{F_o}{F_i n B_e}$	0.48	0.44

12.板束尺寸

取板束理论长度 $L_o=0.48m$; 实际长度 $L=1.2L_o = 0.6m$

板束两侧各一工艺层和一盖板, 盖板厚度 取 6mm, 根据通道排数、板翅尺寸、隔板厚度及盖板厚度等计算板束厚度为 188mm。

板束尺寸为: 360mm × 188mm × 600mm

13.回热器的流动阻力计算公式及结果如表 3.8 所示。

表 3.8 通道排数、理论传热面积与长度

名称	计算公式	数值
相对自由截面	$\frac{xy n_h}{bh n}$	0.388
介质的平均比容 $v_{hm}, m^3/kg$	$v_{hm} = \frac{1}{\gamma_{hm}}$	0.177
收缩损失系数 ξ_c	查图得	0.32
扩大损失系数 ξ_e	查图得	0.46
总阻力损失 p, Pa	$\frac{G_h^2 v_{hi}}{2} [(\xi_c + 1 - \sigma^2) + 2(\frac{v_{ho}}{v_{hi}} - 1) + (\frac{4fL}{D_e}) \frac{v_{hm}}{v_{hi}} - (1 - \sigma^2 - \xi_e) \frac{v_{ho}}{v_{hi}}]$	1465

3.3 板束结构的热应力分析

本章分析采用大型 CAE 通用有限元分析软件，该软件融结构、热、流体、电磁、声学于一体，可广泛用于核工业、铁道、石油化工、航空航天、机械制造、能源、汽车交通、国防军工、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利、日用家电等工业及科学研究^[35]。ANSYS 程序拥有良好的用户界面，使用方便；前后处理、求解及多场分析均采用统一的数据库；具有强大的非线性分析功能；提供丰富的网格划分功能；不仅能够进行对结构、热、流体、电磁场等物理现象的单独研究，还可以进行多物理场耦合的功能，允许在同一模型上进行热-结构耦合、磁-结构耦合以及电-磁-流体-热耦合等耦合计算^{[37][38]}。

板翅式换热器的板束是难于进行强度计算的，至今尚缺少完整的强度计算方法，只是在设计时考虑机械强度的因素^[35]，氦气实验回路中采用的板翅式回热器冷、热流体侧的温差较大，由压力引起的应力与高温差引起的热应力值相比，是极其微小的，在分析中可忽略，因此本文只考虑温差作用下对结构的影响，通过计算机模拟计算热应力以验证结构设计的可行性。回热器材料的热工机械性能见表 3.9。

表 3.9 材料的热工机械性能

物理量	参考公式或数值
导热系数[W/m · K]	$13.28571+1.756205*10^{-2}*T-5.378788*10^{-6}*T^2+4.292929*10^{-9}*T^3$
杨氏模量[GPa]	$200.3795-8.1221*10^{-2}*T$
泊松比	$0.2921+7.169*10^{-5}*T$
热膨胀系数[10^{-3}]	$-0.3520+1.6831*10^{-2}*T+3.6404*10^{-6}*T^2-2.3028*10^{-11}*T^3$
最大许用应力[MPa]	311

根据上节设计板翅尺寸及板翅结构的特点，选取板束中温度最高的截面（即热流体进口处），建立二维简化分析模型如图 3.1 所示，虽然简化模型与实际的板束结构有所不同，但并不影响对其温度场与热应力场的分析。

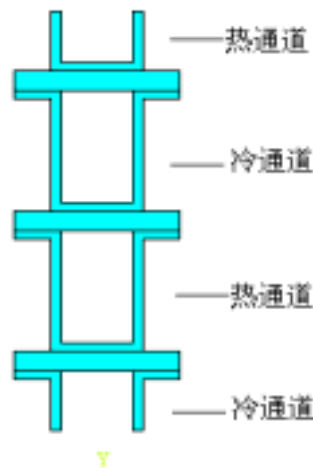


图 3.1 板束简化分析模型

分析中用间接分析的方法，首先采用 8 节点单元 PLANE77 进行热分析，加入的对流换热边界条件（其值见 3.2 节）求解出温度场分布；然后转换到结构单元进行分析，其单元类型自动转换为 8 节点结构单元 PLANE82，在边界上施加耦合自由度约束，并将在热分析中得到的温度结果导入结构单元，根据材料的热工机械性能（见表 3.7）进行热应力分析。在具体分析过程中，采用弹性假设获得应力，为了保证分析结果的安全可靠，本文应力校核采用第四强度理论^[39]来进行验证，分析结果分别如图 3.2 和 3.3 所示。

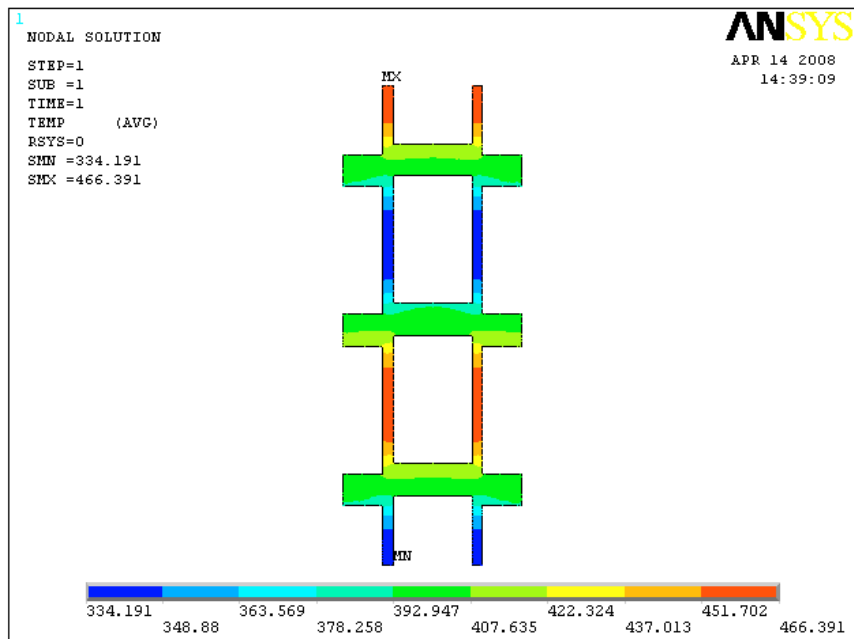


图 3.2 温度场分布

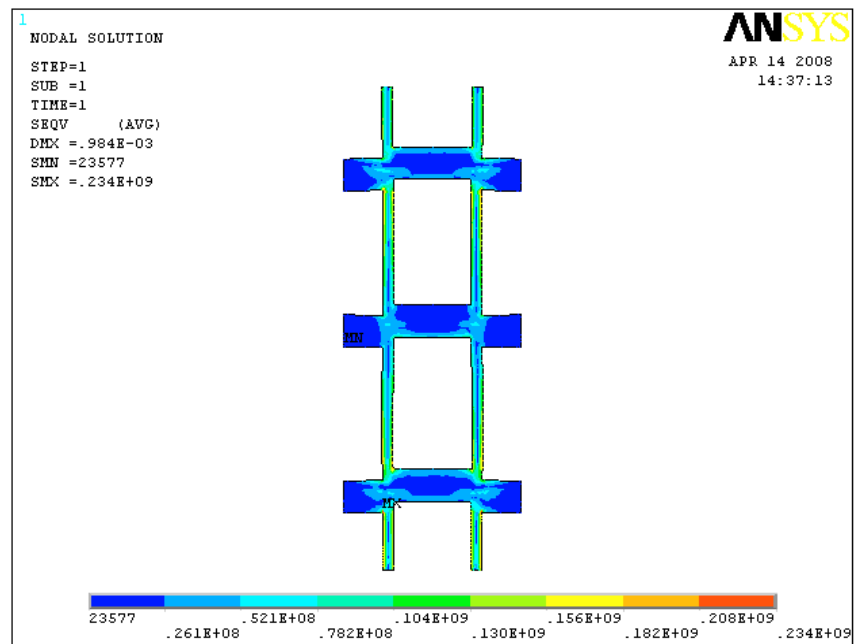


图 3.3 应力场分布

从图 3.1 中可以看出板束结构温度分布均匀，且最高温度与最低温度分别位于高温流体层与低温流体层的中部，最大温差为 132.2℃。图 3.3 应力场分布表明，板束结构应力的最大值为 234MPa，其值在材料的许用应力范围之内。

3.4 本章小结

回热器是主回路中的关键部件，采用板翅式换热器并对其进行热力设计，使压力降满足要求，同时为了验证设计结果的可靠性，使用专业的有限元分析软件分析了板束的温度场与应力场，结果表明设计的结构满足强度要求。

4 关键管系数值模拟与风机管嘴校核

4.1 关键管系数值模拟与应力分析

作用在管道上的载荷主要包括管道自重、支撑载荷、压力载荷及温度载荷等。管道的应力分析一般包括静力分析和动力分析，其中静应力分析主要为一次应力分析和二次应力分析。一次应力是指由管道所受外力荷载引起的正应力和剪应力，它是非自限性的，超过某一限度，将使管道整体变形直至破坏。二次应力是管道由于变形受约束所产生的正应力和剪应力，如由热胀、冷缩和其它位移受约束而产生的应力，它的特征是有自限性^[40]。因此在管道设计时应综合考虑一次应力和二次应力的作用，并留有适当的裕度，以防止因过度的塑性变形或变形受约束而导致管道的破坏。

高温氦实验回路设备中，主回路中管道承受高温高压作用，其所受的载荷是否在管材所允许的安全范围中，对于实验回路安全性是极其重要的。为保证回路的正常运行，防止由于应力过大而引起的管道破裂、设备本体受损、支座破损等事故，对管道进行应力分析是十分必要的。管道设计在保证有足够柔性的前提下，使管道尽可能短，根据回路的设备与管道布置设计，主回路中的管道被分为4部分，如图4.1、4.2、4.3、4.4所示。

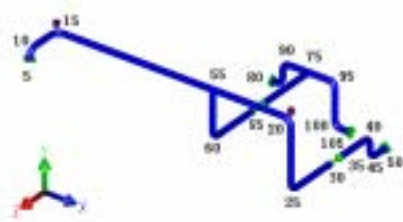


图 4.1 管系 1 布置图



图 4.2 管系 2 布置图

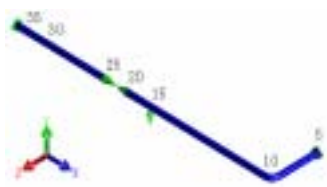


图 4.3 管系 3 布置图

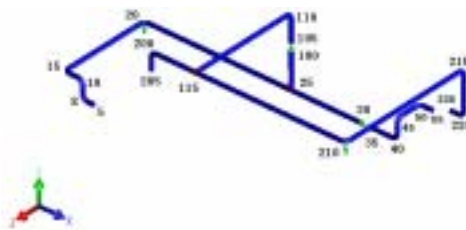


图 4.4 管系 4 布置图

4.1.1 应力校核条件^{[41][42]}

一次应力校核条件 管道中由于压力、重力和其他持续载荷所产生的应力纵向应力之和 σ_L ，不应超过材料在预计最高温度下的许用应力 $[\sigma]^h$ ，即 $\sigma_L \leq [\sigma]^h$

其中管道纵向应力 σ_L 一般认为由压力、附加周向外力和弯矩引起，其计算公式为：

$$\sigma_L = \frac{F}{A} + \frac{PD}{4S} + \frac{M}{W}$$

式中 σ_L ——管道纵向应力，MPa；

F——压力引起轴向力之外的附加轴向力，N；

A——管道横截面积，mm²；

P——设计压力，MPa；

D——平均直径，mm；

S——壁厚，mm；

M——合成弯矩，N·mm；

W——抗弯截面模量，mm³。

二次应力校核条件 计算的最大位移应力范围 σ_E 不应超过许用位移应力范围 $[\sigma]_A$ ， $[\sigma]_A$ 由下式计算：

$$[\sigma]_A = f(1.25[\sigma]^c + 0.25[\sigma]^h)$$

若 $[\sigma]^h$ 大于 σ_L ，则其差值可以加到上式中的 0.25 $[\sigma]^h$ 项上，则许用位移应力范围为：

$$[\sigma]_A = f(1.25([\sigma]^c + [\sigma]^h) - \sigma_L)$$

式中 $[\sigma]^c$ ——在分析中的位移循环内，金属材料在冷态（预计最低温度）下的许用应力，MPa；

$[\sigma]^h$ ——在分析中的位移循环内，金属材料在热态（预计最高温度）下的许用应力，MPa；

σ_L ——管道中由于压力、重力和其他持续载荷所产生的应力纵向应力之和，MPa；

$[\sigma]_A$ ——许用位移应力范围，MPa；

f ——管道位移应力范围减小系数，其值由表 4.1 确定：

表 4.1 允许应力范围减小系数 f

循环当量数 N	系数 f	循环当量数 N	系数 f
N < 7000	1.0	45000 < N < 100000	0.6
7000 < N < 14000	0.9	100000 < N < 200000	0.5
14000 < N < 22000	0.8	200000 < N < 700000	0.4
22000 < N < 45000	0.7	700000 < N < 2000000	0.3

4.1.2 管系数值模拟与应力分析

本文采用的管道分析软件 CAESAR 基于有限元法的专用 CFD 求解器 Polyflow, 是美国 COADE 工程软件公司研发的压力管道应力分析专业软件, 使用简单的梁单元建立管系模型并定义载荷, 结果以位移、载荷和应力等形式表示。该软件包括最新的国际通用的管道库, 可以进行静态、动态等多种分析模式, 其交互式功能可以快速评估输入和输出, 为改进设计和分析循环提供完美的匹配, 是当今世界上用户最多的应力分析软件之一, 在国内管道应力分析领域也已得到广泛应用。

根据要求将计算条件(温度、压力等)、管子材料特性(杨氏弹性模量、线膨胀系数等)、管子尺寸(直径、壁厚、长度)、空间走向、约束方式等作为基本数据输入。在数据发生变化的地方设立节点, 节点编号如图 4.1、4.2、4.3、4.4 所示, 计算中管道标准采用美国的 ASME B31.1 通过计算所得的各管系节点应力情况分别列于表 4.2、4.3、4.4、4.5 中。

表 4.2 管系 1 各节点应力情况

节点号	一次应力值 (kPa)	二次应力值 (kPa)	一次应力许 用值 (kPa)	二次应力许 用值 (kPa)	一次应力占许用 应力的百分比	二次应力占许用 应力的百分比
5	31144	29034	118948	289909	26.18%	10.01%
10	28264	19225	118948	292789	23.76%	6.57%
15	35023	61093	118948	286031	29.44%	21.36%
20	36083	40592	118948	284971	30.34%	14.24%
25	27263	30783	118948	293791	22.92%	10.48%
30	31593	10377	118948	289461	26.56%	3.58%
35	32322	13716	118948	288732	27.17%	4.75%
40	30396	36540	118948	290657	25.55%	12.57%
45	32642	51119	118948	288411	27.44%	17.72%
50	31786	46395	118948	289268	26.72%	16.04%
55	54132	95323	118948	272755	45.51%	34.95%
60	31516	53372	118948	289538	26.50%	18.43%
65	32568	17030	118948	288485	27.38%	5.90%
70	31703	18208	118948	289351	26.65%	6.29%
75	37949	141865	106427	272458	35.66%	52.07%
80	27703	110864	106427	277698	26.03%	39.92%
85	28290	167847	106427	277112	26.58%	60.57%
90	29294	26254	106427	276107	27.52%	9.51%
95	30998	196610	106427	274404	29.13%	71.65%
100	26117	211533	106427	279286	24.54%	75.74%
105	28069	86812	106427	277333	26.37%	31.30%

表 4.3 管系 2 各节点应力情况

节点号	一次应力值 (kPa)	二次应力值 (kPa)	一次应力许用值 (kPa)	二次应力许用值 (kPa)	一次应力占许用应力的百分比	二次应力占许用应力的百分比
5	25126	19082	137895	319612	18.22%	5.97%
10	25260	14077	137895	319477	18.32%	4.41%
15	25831	29163	137895	318907	18.73%	9.14%
20	26478	18321	137895	318259	19.20%	5.76%
25	31832	5849	137895	312905	23.08%	1.87%

表 4.4 管系 3 各节点应力情况

节点号	一次应力值 (kPa)	二次应力值 (kPa)	一次应力许用值 (kPa)	二次应力许用值 (kPa)	一次应力占许用应力的百分比	二次应力占许用应力的百分比
5	33579	272040	137895	311159	24.35%	87.43%
10	25113	93782	137895	319624	18.21%	29.34%
15	30989	16199	137895	313748	22.47%	5.16%
20	25337	7952	137895	319400	18.37%	2.49%
25	27244	295	137895	317493	19.76%	0.09%
30	22930	27517	137895	317266	16.63%	8.67%
35	25161	25600	137895	319575	18.25%	8.01%

表 4.5 管系 4 各节点应力情况

节点号	一次应力值 (kPa)	二次应力值 (kPa)	一次应力许用值 (kPa)	二次应力许用值 (kPa)	一次应力占许用应力的百分比	二次应力占许用应力的百分比
5	31418	17775	137895	313318	22.78%	5.67%
8	28489	16497	137895	316249	20.66%	5.22%
10	26282	20928	137895	318455	19.06%	6.57%
15	25264	19690	137895	319472	18.32%	6.16%
20	29770	26965	137895	314966	21.59%	8.56%
25	41765	29509	137895	305984	30.29%	9.64%
30	31750	9426	137895	312988	23.02%	3.01%
35	31174	9548	137895	313563	22.61%	3.05%
40	26667	12062	137895	318071	19.34%	3.79%
45	26624	14589	137895	318114	19.31%	4.59%
50	27828	15593	137895	316909	20.18%	4.92%
55	30840	12253	137895	313896	22.36%	3.90%
100	28224	11389	137895	316512	20.47%	3.60%
105	28537	10555	137895	316200	20.69%	3.34%
110	37929	12481	137895	306808	27.51%	4.07%
115	39156	31806	137895	315673	28.40%	10.08%
200	48194	6184	137895	296544	34.95%	2.09%
205	39752	9378	137895	304984	28.83%	3.07%
210	29898	24330	137895	314839	21.68%	7.73%
215	30883	11092	137895	313853	22.40%	3.53%
220	26073	17164	137895	318664	18.91%	5.39%
225	28514	13632	137895	316223	20.68%	4.31%

从表 4.2、4.3、4.4、4.5 的计算结果中可以看出 4 段管系中的各节点所受的应力情况均在许用范围内，其中一次应力值在各节点分布比较均匀，但由于温度、附加位移等引起的二次应力值在某些节点分布差别比较大。如在管系 1 中最大二次应力发生在节点 100 处，其值为 211533kPa，占其许用值的 75.74%；在管系 3 中最大二次应力发生在节点 5 处，其值为 272040kPa，占其许用值的 87.43%，在今后详细设计中可

考虑设计适当地约束或改变管道走向等方法降低其应力值。

4.2 风机管嘴模拟计算与校核

在高温/高压氦实验回路的设计中，氦风机属于高速转动设备，在运行过程中由于受介质温度、压力等因素的影响，管道可能会产生载荷附加力，若配管设计的约束点和约束形式不合理，会引起管道的局部作用载荷不均衡、管系震动严重及管端扭矩过大等问题，由此导致风机转动轴不对称，转子和定子的间隙改变，影响设备的正常运行甚至损坏设备^[43]。因此，对回路的风机配管进行模拟计算、强度校核及安全性分析是必要的。

4.2.1 风机进口管嘴模拟计算与校核

实验回路中风机为离心式气体压缩机，配管应力计算中管道标准采用美国的 ASME B31.1，压缩机标准采用 API 617，根据这些标准，在风机单独管口校核中，风机进、出口管嘴的许用力和力矩须满足下式：

$$F+1.09M < 54De$$

式中 De ——当量直径，mm；当管口公称直径不大于 200 时， De =管口公称直径；

当管口公称直径大于 200 时， $De=(\text{管口公称直径}+400)/3$ ；

F ——单个管口上的合力，N；

M ——单个管口上的合力矩，N·m。

取风机进出、口管嘴直径均为 125mm，则其许用力和力矩公式均需满足 $F+1.09M < 6750$

根据回路系统的设备布置和场地要求，管道布置如图 4.3 所示，主要考察风机进口管嘴的受力情况。通过计算得出风机进口管嘴节点 35 与支吊点 15 的受力情况，见表 4.6。其中， F_x ， F_y ， F_z 分别表示节点在 x、y、z 三个方向的受力， M_x 、 M_y 、 M_z 分别表示节点在 x、y、z 三个方向所受的力矩。

表 4.6 风机进口管嘴及支吊点受力情况

节点号	力/(N)			力矩/(kN·m ⁻¹)		
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
35	-21274	-672	1055	36	-2076	-351
15	0	-1505	0	0	0	0

从表 4.6 中的结果可以看出，风机进口管嘴的载荷过大，仅在 x 方向的受力值就已远远超过了允许值 6750，可能损坏设备，因此需要对其进行调整。降低风机管口和支吊点的受力可以利用弹簧支吊架放松约束、选用补偿器或改变管道走向等方法。由于补偿器价格较高，一般在条件允许的情况下采用增加弹簧支吊架或改变管道走向的方法增加管道柔性，调整后管道布置图如图 4.5 所示。

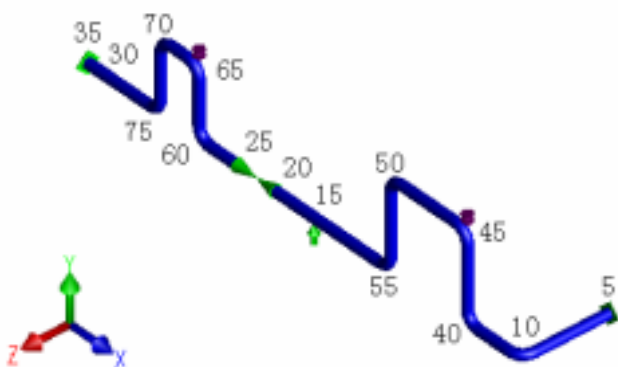


图 4.5 调整后风机进口配管布置

配管布置除改变管道走向外，在节点 45 和节点 65 处增设了弹簧支吊架，调整后风机进口管嘴及支吊点受力情况见表 4.7。

表 4.7 调整后风机进口管嘴及支吊点受力情况

节点号	力/(N)			力矩/(kN·m ⁻¹)		
	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
35	-2043	-507	78	20	-173	399
15	0	-972	0	0	0	0
45	0	-1233	0	0	0	0
65	0	1043	0	0	0	0

由表 4.7 的计算结果可以看出，风机管嘴受力得到明显改善，力和力矩均有很大

程度的降低，各支吊点的受力也比较均衡， $F+1.09M$ 为 2581，只占许用值的 38.24%，为风机出口配管的设计放宽了要求。

4.2.2 风机出口管嘴模拟计算校核

根据回路系统的设备布置和场地要求，管道布置如图 4.4 所示，图中根据计算流程要求编制节点号，主要考察风机出口管嘴和支吊点的受力情况。

通过计算得出风机出口管嘴节点 5 及支吊点的受力情况，见表 4.8。其中， F_x ， F_y ， F_z 分别表示节点在 x 、 y 、 z 三个方向的受力， M_x 、 M_y 、 M_z 分别表示节点在 x 、 y 、 z 三个方向所受的力矩。

表 4.8 风机出口管嘴及支吊点受力情况

节点号	力/(N)			力矩/(kN·m ⁻¹)		
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
5	-754	-1074	228	-174	1048	720
20	0	-1139	0	0	0	0
110	0	-3600	0	0	0	0
210	0	-1687	0	0	0	0

从表 4.8 中可以看出，各支吊点的受力的受力较均衡，对于风机出口管嘴 $F+1.09M=2731$ ，只占许用值 6750 的 40.46%。

4.2.3 整个设备模拟计算与校核

在对整个设备校核中，合力和合力矩应满足以下条件：

$$F_C+1.09M_C < 40.498D_C$$

式中 F_C ——风机进口、出口的合力，N；

M_C ——风机进口、出口的力与力矩合成到出口中心处的合力矩，N·m；

D_C ——面积等于所有各个设备管嘴面积之和的开孔直径，mm；当各管口面积之和折合成圆形的折算直径不大于 230mm 时， D_C =折算直径；当各管口面积之和折合成圆形的折算直径大于 230mm 时， $D_C=(\text{折算直径}+460)/3$

本设计中进、出口管嘴直径均为 125mm，计算得 $D_C=176.78\text{mm}$ ，因此合力和合

力矩应满足条件： $F_C + 1.09M_C < 7159$

F_C 和 M_C 在 X、Y、Z 三个方向的分力和力矩应满足以下条件：

$$|F_{cx}| \quad 16.199D_C \qquad |M_{cx}| \quad 24.688D_C$$

$$|F_{cy}| \quad 40.498D_C \qquad |M_{cy}| \quad 12.343D_C$$

$$|F_{cz}| \quad 32.399D_C \qquad |M_{cz}| \quad 12.343D_C$$

式中 F_{cx} 、 F_{cy} 、 F_{cz} —— F_C 在 X、Y、Z 方向上的分力，N；

M_{cx} 、 M_{cy} 、 M_{cz} —— M_C 在 X、Y、Z 方向上的分力矩，N·m

计算结果列于表 4.9 和表 4.10 中。

表 4.9 风机整个设备校核各方向受力情况

	各方向分力数值/ (N)	各方向分力许用值/ (N)	各方向分力占许用值的百分比
SFX	-2797	2864	97.66%
SFY	-1581	7159	22.08%
SFZ	306	5727	5.34%

表 4.10 风机整个设备校核各方向所受力矩情况

	各方向分力矩数值/ (kN·m ⁻¹)	各方向分力矩许用值/ (kN·m ⁻¹)	各方向分力矩占许用值的 百分比
SMX	-154	4364	3.53%
SMY	875	2174	40.25%
SMZ	1119	2182	51.28%

从表 4.9 和表 4.10 中可以看出在整个设备校核中各个方向力和力矩均在允许范围之内，而且 $F_C + 1.64M_C = 5571$ ，占其许用值 7159 的 77.82%，因此本设计符合要求，但在 X 方向分力比较大，几乎接近于许用值，在今后的详细设计中还有待于进一步改进。

4.3 调整后的管系应力校核

上一节主要考虑风机管嘴及支吊点的受力情况，并根据需要对初步设计管系进行

了相应调整 ,本节对调整后的管系进行应力校核 ,调整后各节点的应力列于表 4.11 中。

表 4.11 调整后管系各节点应力

节点号	一次应力值 (kPa)	二次应力值 (kPa)	一次应力许用值 (kPa)	二次应力许用值 (kPa)	一次应力占许用应力的百分比	二次应力占许用应力的百分比
5	26939	29681	137895	317798	19.54%	9.34%
10	25542	14618	137895	319194	18.52%	4.58%
15	29177	14365	137895	315561	21.16%	4.55%
20	25137	13350	137895	319600	18.23%	4.18%
25	25850	12362	137895	318888	18.75%	3.88%
30	25418	9207	137895	319319	18.43%	2.88%
35	22421	6851	137895	322316	16.26%	2.13%
40	26963	10245	137895	317774	19.55%	3.22%
45	29115	34130	137895	315623	21.11%	10.81%
50	27892	23771	137895	316845	20.23%	7.50%
55	26630	20976	137895	318107	19.31%	6.59%
60	25333	10429	137895	319403	18.37%	3.27%
65	27085	23821	137895	317652	19.64%	7.50%
70	25859	17139	137895	318879	18.75%	5.37%
75	25464	16246	137895	319274	18.47%	5.09%

由表 4.11 可以看出调整后的管系各节点所受的应力均在允许范围内 ,且通过调整管道走向及设计合理的支吊点形式增加了管道柔性 ,使二次应力在各节点的分布较调整前均匀。

4.4 本章小结

管道是高温氦实验主回路中重要的部分 ,而管道系统设计是个复杂的优化问题 ,一个经济、合理的设计需要综合考虑管道的安装条件、支吊架生根的可能性、管道的应力水平以及与管道连接的设备管嘴的受力情况等因素。本章通过对主回路中管系数值模拟和风机进出口管嘴受力校核分析 ,改进管道设计 ,使管道在满足许用应力的基础上又有足够的柔性并且对风机设备不会造成破坏性影响。

5 氦气实验回路的运行与安全

5.1 回路的运行

用于测试 ITER-TBM 的高温高压氦气实验回路的建设运行分为多个独立的状态，以完成实验目标。在此过程中，需进行各种必要的试验，以保证安装好的各个部件、设备和系统，及整个回路都能按设计要求及有关准则正确运行。表 5.1 列出了氦气实验回路调试启动运行各阶段的主要工作内容。

表 5.1 氦回路各阶段综述

分类	试验类别	试验名称	实验主要内容	
运行前试验	设备初步试验及基本系统试验	单独系统的独立试验	设备投入	清洗、通电控制模拟试验、单个系统性能试验
		主要系统联合试验		联合系统联合试验
	主回路及辅助系统实验前冷态和热态综合试验	冷态压力试验	模拟运行工况	回路压力试验用主泵升温升压
		热态试验准备		模拟冷备用全运行等试验阶段
		试验件安装准备		设备检查、保护动作试验
	运行试验	启动、升功率试验	试验件安装	实际运行工况
运行性能验证试验			升功率至实验全运行要求	
全运行试验		数据采集	按实验目标采集所需参数	

运行前实验包括设备运行前的检查、模拟运行试验各阶段两大部分。运行试验包括从实验件安装、启动、升功率、全功率运行、数据采集到实验结束一系列步骤。按照运行状态可以将以上阶段划分为预运行、冷备用、热备用、全运行、部件实验几种状态，这些状态将在下面做详细介绍。

（1） 预运行试验

预运行试验包括运行前试验和运行试验之前的检查、除杂质、实验部件安装等步骤，其目的是保证以后的模拟运行及实际运行能够安全进行实验。

氦气实验回路的各个系统，特别是主回路系统必须保持很高的清洁度，一般在设备出厂时即应达到清洁度的要求，运到现场就能安装。在安装过程中要保持工作现场的整洁，执行严格的施工管理，不使任何污物进入设备或管道。即使如此，仍可能有少量杂质、污物混入系统，它们会污染工作介质，给实验带来不良后果，所以在各系统安装后，实验运行之前，必须进行清洗。

在实验段部件安装阶段，管道和设备充满氦气，管道与实验部件的接口段闸门阀密封。回路的压力和温度与环境相同，分别约为 35℃、0.1MPa，回路中所有的设备（电加热器、风机、冷却器）处于关闭状态。在实验部件安装完成后，将对实验部件及其容器进行清理和抽真空处理，然后可打开闸门阀并对回路进行蓄压。

在实验部件安装完成后，对氦气实验回路进行烘烤，其目的是为了除去回路中部分杂质气体，需要将回路温度提高到 240℃。这一阶段保持回路压力为 1MPa，氦气流量调整为 0.13kg/s。在此压力和流量调节完成后，打开电加热器，直到温度上升至 240℃。

（2） 冷备用阶段

氦气实验回路的部分实验短时间内不可能完成，中断过程中回路不需停止，而维持在很低水平的工作状态下，称为冷备用阶段。在冷备用阶段，氦气实验回路停止运行相对较长一段时间，但目标实验并未结束的状态。此时，回路的压力调整为 1MPa，回路中多余的气体贮入压力调节系统的容器中。回路中氦气风机低功率运行，氦气流量降低为 0.13kg/s，电加热器停止工作。在这一阶段，相关的辅助系统，如氦气净化系统、水冷却系统等，可以照常工作以验证其实用性。

（3）热备用阶段

热备用阶段是在氦气实验回路实验过程中短暂停止的一种状态。热备用状态可以分为两种情况，一是 TBM 实验端入口氦气温度保持为 100℃，压力和流量处于正常工作下的 8MPa 和 1kg/s；二是 TBM 入口氦气温度为 300℃，压力和流量同样处于正常工作状态下。两种状态下氦气流过 TBM 包层可以近似看作绝热流动。

第一种状态是模拟 ITER 氦气冷却回路停止工作较长时间而等待重启的状态。此时，氦气通过风机后温度由 50℃ 升为约 100℃，回热器不投入使用。若风机不能将氦气温度提升到 100℃，则打开电加热器将由风机出来的氦气加热到 100℃。

第二种状态是模拟 ITER 氦气冷却回路停止较短时间而等待重启的状态。此时，回路中回热器继续投入运行，从回热器出来的氦气由电加热器将氦气温度加热到 300℃，再进入 TBM。

回路若是从上述的第一种状态重新启动，则需要先将回路参数提升到第二种状态下再进入实验阶段。此过程需要通过压力控制调节系统移走部分氦气以保持回路的压力为 8MPa。

（4）全运行阶段

全运行阶段是完全模拟 ITER 等离子体燃烧时的氦气冷却回路。同样，与热备用状态类似根据不同的实验目的全运行阶段也有两种状态：由热备用第一状态进入全运行阶段，此时回路的压力为 8MPa，TBM 入口氦气温度为 100℃。通过电加热模拟 ITER-TBM 获得的热量，TBM 出口氦气温度达到 300℃。另外，由热备用第二状态进入全运行阶段，此时回路中的压力为 8MPa，TBM 入口氦气温度达到 300℃，出口温度为 500℃。

5.2 系统安全

5.2.1 安全设计

氦气实验回路运行在高温高压的状态下，而且氦气易泄漏的性质要求回路的设计和安全措施能够保证在任何事故工况下不至于对回路产生大的破坏和对操作人员的人身威胁。氦气实验回路的安全设计包括回路中的各类辅助安全设备、稳态运行下的

热工水力分析、各类事故工况下的保护措施两部分。

安全设施 氦气实验回路的安全隐患主要是其高温高压的运行状态,因此在安全设施主要用于抑制回路中局部温度和压力过高的发生,即在回路的冷管段氦气风机出口段安装有安全阀,在电加热器和 TBM 电源线端有限温保护装置。安全阀的作用是在回路中压力过高,而压力调节系统失灵的情况下,通过排出过余氦气降低回路压力以保护回路。电加热器和 TBM 电源线限温保护装置实际上就是电加热器和 TBM 下端有一段连接件为紫铜和不锈钢板制成,正常工作温度不应超过 700 。当加热器失去冷却时将导致这部分结构首先烧毁,以此来保护电加热器和 TBM 实验包层不至因温度过高而损坏。

稳态运行工况 氦气实验回路稳态运行工况的安全设计主要是指在回路正常运行下,管道及设备的静应力能够满足结构材料的允许要求,需根据设备和管道布置情况以及设备要求进行分析。管道应力分析应保证管道在设计条件下具有足够的柔性,防止管道因热胀冷缩、管道支承或端点附加位移造成应力过大问题。设备校核主要考虑设备进出口配管在稳态工况下对设备管嘴产生的力的作用应在设备允许范围内以免影响设备正常运行甚至损坏设备。

事故工况 事故工况下安全设计目的主要是在回路事故工况下能够通过有效措施减小危害及模拟 ITER 氦气冷却系统在事故工况下的反应。ITER 氦气冷却回路有可能发生的主要事故工况有失水事故 (LOCA)、失流事故 (LOFA)。

1. 加热器失去冷却时的安全保护:

当风机断电或出现故障,或管路出现故障使氦气不能正常循环而加热器继续加热时,则加热器失去冷却本身温度将升高。

电加热器的加热管熔化温度为 1350 ,但电加热器下端有一段连接件为紫铜和不锈钢板制成,正常工作温度不应超过 700 。当加热器失去冷却时将导致这部分结构首先烧毁。

为此采取安全保护措施:氦风机不启动时电加热器不能工作。监测主回路流量测量的压差信号,当风机进出口压差小于 20kPa 时,或氦气总流量小于 45m³/h 时自动切断电源停止加热。

2. 氦气不能被冷却时的安全保护：

主冷却器一次侧是氦气，二次侧是水。当主循环泵断电或出现故障时，或管路出现故障不能正常供水时则氦气不能被冷却。

氦气风机进口的工作温度是 50~100℃，设计值内部温度为 150℃。主冷却器入口氦气温度为 150℃ 以上，若不能在主冷却器被冷却而进入氦风机将造成风机内部温度过高而损坏。

为此采取的保护措施为：监测主冷却器后风机进口氦气的温度，当温度高于 120℃ 时切断电加热器电源停止加热。

5.2.2 安全操作

为了保障氦气试验回路的安全运行，必须注意运行操作中的安全，以免因操作不当引起事故。主要应注意以下几个方面：

压力容器安全操作 正确地操作压力容器必须做到：严格控制工艺参数，将容器缺陷的产生和发展控制在一定的范围内，并保持连续稳定生产；平稳操作，即缓慢加载和卸载，及运行期间保持载荷的相对稳定，避免容器产生脆性破裂和疲劳破裂；根据回路要求，制定并严格执行操作规程；加强设备维护保养，运行中保持完好的防护层，消除产生腐蚀的因素，消灭容器的“跑冒滴漏”，经常保持容器外表及附件等完好，停用时也要保持容器内干燥、清洁，外表面防腐蚀。

风机启动与运行 首先做好各项准备工作，包括供电系统准备，冷却水系统准备，压缩空气与启动调节阀系统准备，仪器仪表准备和回路中的氦气准备等。然后严格按照氦风机变频率电源操作规程启动风机，调节碟形阀开度改变主回路中气体流量。风机运行时要满足回路中最低气体密度的要求，并保证不超温运行。

加热运行 在常温运行正常情况下才能加热运行。功率从小到大，同时密切注意压力、温度、流量等主要参数的变化。运行结束步骤与启动步骤相反，首先停止电加热器加热，在氦气温度降到安全值以下时才能停风机，最后停冷却水供应，回路运行期间充分注意人身安全。

5.2.3 安全管理

根据设备的数量和种类，建立专业管理和技术监察小组，负责设备的安全技术管理工作；按照回路流程要求和设备的技术性能制定合理的安全操作规程，对操作人员进行必要的培训和教育，要求他们严格遵照执行；加强回路的日常使用管理和维护保养，并对关键设备进行定期的技术检验，以便及早发现问题，消除隐患，保证回路的安全运行。

6 总结与展望

6.1 总结

本文在调研国内外氦气实验回路的基础上,主要针对 TBM 系统设计测试的目标,提出了符合 TBM 在 ITER 上运行参数的高温/高压氦气实验回路的概念设计。提出了实验回路中的氦冷主回路系统、压力控制系统、水冷系统、氦气净化系统、数据采集与监控系统等系统的概念设计并对各个系统中的主要部件进行了描述。

主回路中的关键部件回热器采用高效、紧凑的板翅式换热器,本文介绍了板翅式换热器的设计方法并给出了计算结果,通过有限元分析软件 ANSYS 对设计的板束进行了热应力分析,分析结果表明设计的结构满足强度要求。

使用专业的管道分析软件模拟、分析了关键管系的应力情况,并对风机进出口管嘴的受力情况进行了校核,通过改进管道走向和支吊点位置及形式的方式,使管道处于较小的应力状态同时保持足够的柔性使得对风机设备不会造成破坏性影响。

阐述了回路各运行阶段的实验状态,针对回路的安全进行了相应的设计并对系统的安全操作和管理提出了要求。

6.2 今后工作展望

发展高温/高压实验回路对于鉴定 HCSB TBM 模块在 ITER 上的实验可行性,评价 TBM 模块的设计规范以及掌握氦气实验回路设计、建造、运行的技术和经验具有非常重要的意义,但由于氦气易渗透、导热性较差、回路温度和压力高等特点,高温高压的氦气回路的建设难度很大,尤其对是部分关键部件的设计、回路的泄漏与安全等提出了更高的要求。本文只是提出了回路的概念设计并进行了简单的分析,在今后的详细设计和工程设计中还有很多细致的问题需要进一步研究,主要有以下几个方面:

- (1) 回路中各部件详细尺寸、形式、使用方法、注意事项以及生产厂家等

各方面信息仍需进一步落实；

- (2) 根据选定部件具体情况进行回路中管系的设置与优化并分析其对设备的影响；
- (3) 细化实验内容、实验方法及实现途径等。

致 谢

本学位论文是在导师陈焕新教授和冯开明研究员的热情关怀和悉心指导下完成的，在基础课程学习以及论文的选题、研究和撰写过程中两位导师倾注了很多心血和汗水。两位老师严谨求实的治学态度、渊博的知识、卓越的才智、敏锐的思维、创造性的学术思想、谦逊朴实的风格以及对工作饱满的热情给我留下了深刻的印象，是我学习的好榜样。在为人处事方面，两位老师的谆谆教诲也使我受益匪浅；在生活上，两位导师也给予了无私的帮助和细致的关心。值此论文完成之际，谨向两位恩师致以由衷的谢意和诚挚的祝福！

感谢同实验室谢军龙老师、鲁红亮师兄、陶红歌师姐、欧子浩、刘杰、周丽、张来强、叶艳琴等同学对我在学习和生活上的关心和帮助。

感谢核工业西南物理研究院 105 室全体成员对我的帮助，尤其是许增裕主任、张国书老师和叶兴福、赵周、袁涛、陈志、康伟山等几位师兄，以及同学闫慧博、刘丹华等，感谢他们在学习和工作中对我的关心和支持。

感谢室友刘璇斐、李晨、胡琴、刘春华，她们在生活上给了我无私的帮助，在此向她们表示衷心的感谢！

在几年的研究生学习生活中，我的父母和亲人对我的学习和生活给予了无微不至的关怀，为我完成学业提供了坚强的后盾。父母的谆谆教诲，对我人生观方面的引导，成为我学习和工作的动力，在此，向他们表示我最诚挚的谢意！

同时，感谢所有关心和支持我的朋友们！

马丽华

2008 年 04 月 16 日

参考文献

- [1] 冯开明. ITER 实验包层计划综述[J]. 核聚变与等离子体物理 ,2006 ,26(03):161 ~ 169.
- [2] 赵君煜. 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划.
- [3] R Aymar, P Barabaschi and Y Shimomura. The ITER design[J]. PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION,2002,44(2002):519 ~ 565.
- [4] Feng K M, Zhang G SH, Wang X Y, et al. Design description document for the Chinese helium-cooled Solid Breeder Test Blanket Module(CH HC-SB) TBM(intermedial report)[R].SWIP,2004.
- [5] Feng K M. Design description document for the Chinese helium-cooled Solid Breeder Test Blanket Module(CH HC-SB) TBM(Final Report)[R]. Chengdu:SWIP,2005.
- [6] Feng K M, Pan C H. Preliminary design for a China ITER test blanket module[J].Nucl. Eng. Design, 2005.
- [7] Feng K M. Progress and status of CH HC-SB TBM program[R].Presented at the ITER TBWG-16 Meeting, Beijing:2005.
- [8] 周惠忠.氦回路用风机的特点及与堆用主风机的比较[J].核动力工程 ,1995 ,16(6) , 555 ~ 562.
- [9] 姚梅生,博金海 , 韩兵等.氦气试验回路和热气导管性能试验装置[J].清华大学学报 (自然科学版) , 1995 , 35 , 31 ~ 36.
- [10] 周惠忠 , 向林 , 洪玉生. HTR—10 高温气冷堆一回路电气贯穿件的研制[J].高技术通讯 , 2005 , 15 (01) , 54 ~ 57.
- [11] 吴莘馨 彭木彰. HTR-10 氦气阀门设计要求[J].清华大学学报(自然科学版) 1998,38(05),84 ~ 87.
- [12] 厉日竹 , 李笑天 , 傅激扬.HTR-中间换热器设计[J].高技术通讯 , 2000 ,(4) , 23 ~ 25.
- [13] 姚梅生 , 吴莘鑫 , 翁锡镛等.氦气试验中的氦净化[J].核动力工程 , 1995 , 16 (5) ,

470 ~ 474.

- [14] G. Dell’Orco. HE-FUS3 European Helium Cooled Blanket Test Facility for DEMO, 1st Meeting on HCPB Blanket Design, Karlsruhe 18 June 1996.
- [15] M.Gasparotto. EU TBMs proposal, Domestic development & qualification program, Ad Hoc Group on the ITER Test Blanket Modules Program (AHG/TBM) Kick-off Meeting, Cadarache ITER JWS, July 10th, 2006.
- [16] B.E.Ghidesa, M.Ionescu-Bujor, G.Janeschitz. Helium Loop Karlsruhe (HELOKA) – A valuable tool for testing and qualifying ITER components and their He cooling circuits[J]. Fusion Engineering and Design, 81(2006),1471 ~ 1476.
- [17] M.Ionescu-Bujor, B.E.Ghidesa, G.Janeschitz, et al. Helium Loop Karlsruhe (HELOKA) – large experimental facility for the in-vessel ITER and DEMO components, FT/P7-12.
- [18] L.V. Boccaccini, H. Neuberger, X. Jin, et al. System Engineering and ITER Integration of the EU HCPB Test Blanket Module System, ITER-Related IAEA Fusion Energy Conference, 2006.
- [19] Vladimir Kuznetsov, A.Kokoulin, I.Mazul, et al. Experimental loop for tests of helium cooled high heat flux components at 600C/10MPa helium inlet[R]. 24th Symposium on Fusion Technology, Poland September 2006.
- [20] Hermsmeyer S, Gordeev S, Kleefeldt K, et al. Improved helium cooled pebble bed blanket [R]. FZKA 6399, Dec.1999.
- [21] RF Home Team. Breeding material choice, section 4.3.2 materials assessment report[R]. The ITER documentation, 2001.
- [22] Boccaccini L V, Piazza G, Rabaglino E, et al. Beryllium pebble beds for EU HCPB test blanket module, section 4.1.1 materials assessment report [R]. The ITER documentation, 2001.
- [23] FENG Kai-ming, ZHANG Guo-shu, HU Gang, et al. Design Description Document for the Chinese Helium Cooled Solid Breeder (CH HCSB) Test Blanket Module (Version III)[R]. SWIP, August, 2006.
- [24] L.V. Boccaccini, N. Bekris, L.V. Boccaccini, et al. Design Description Document for the European Helium Cooled Pebble Bed (HCPB) Test Blanket Modules[R] . Forschungszentrum Karlsruhe, December, 2005.

- [25] 廖翠萍,施福恩. 高温气冷堆 He 载气中 H₂ 和 CO 转化实验研究[J].原子能科学技术, 1995, 29(5), 441 ~ 448
- [26] 廖翠萍,施福恩. 高温气冷堆 He 载气中 H₂O 和 CO₂ 吸附净化的实验研究[J].原子能科学技术, 1998, 32(5), 438 ~ 444
- [27] 朱江,王宇澄,黄志勇等.10MW 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
- [28] 周惠忠. 高压氦风机的主要技术特点及运行情况[J]. 高技术通讯, 1995 (9), 50 ~ 52
- [29] 周蕙忠,王捷,汤全法. HTR-10 主氦循环风机的设计、试验和运行[J]. 核动力工程, 2004, 25 (1), 54 ~ 58
- [30] 魏信利,吴金星.压力容器现代设计与安全技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- [31] 吴莘馨,彭木彰. 10MW 高温气冷堆堆用氦气阀门要求的研究[J].高技术通讯, 1997, 54 ~ 57
- [32] 周建华,王名利,曾辉等. HTR-10 氦净化系统设计[J].核动力工程, 2003, 24 (4), 363 ~ 365
- [33] 钱颂文主编.换热器设计手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- [34] [日]尾花英郎著,徐中汉译.换热器设计手册[M].北京:烃加工出版社, 1982.
- [35] 秦叔经,叶文邦.换热器[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
- [36] 龚曙光主编.ANSYS 基础应用及范例解析[M].北京:机械工业出版社, 2004.
- [37] 高耀东.ANSYS 机械工程应用 25 例[M].北京:电子工业出版社, 2007.
- [38] 龚曙光主编.ANSYS 工程应用实例解析[M].北京:机械工业出版社, 2003.
- [39] 刘鸿文主编.材料力学:上册,第三版[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.
- [40] 陈俊.管道应力及固定点受力分析[J].化工设计通讯, 2001, 27 (03): 32 ~ 34.
- [41] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京:中国石化出版社, 2003.
- [42] 岳进才.压力管道技术[M].北京:中国石化出版社, 2006.
- [43] 毛悠仁,赵晓政,刘江涛.CAESAR 软件在离心压缩机配管受力分析的应用[J]. 化工生产与技术, 2006, 13 (03): 39 ~ 40.

附录 1 作者在攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 马丽华, 陈焕新, 谢军龙等.离心式 CO₂压缩机运行工况点物性参数的计算. 风机技术, 2007, (05), 19~22.