

# 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层热工水力学参数设计与分析

汪卫华, 吴宜灿, 王红艳, 柯 严, 黄群英

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层是一个以氦气和液态金属 LiPb 为冷却剂, 以嬗变核废料为主要目的的多功能包层。依据功率平衡模型对不同工况优化的基础上, 对该包层热工系统参数进行了设计分析。采用三维商用计算流体力学程序对第一壁和高功率密度区中液态 LiPb 的流场进行数值模拟计算, 给出了优化的典型热工水力参数。

**关键词:**聚变; 次临界堆; 双冷嬗变包层; 热工水力学

**中图分类号:**TL62.6 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2004)01-0091-05

## Thermal-hydraulic design and analysis on dual-cooled waste transmutation blanket for the fusion driven sub-critical system

WANG Wei-hua, WU Yi-can, WANG Hong-yan, KE Yan, HUANG Qun-ying

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei of Anhui Prov. 230031, China)

**Abstract:** The thermal-hydraulic analysis and design of the pressured helium gas and liquid metal LiPb dual-cooled waste transmutation blanket (DWTB) for the Fusion Driven Sub-critical system (FDS) are presented. Thermal-hydraulic parameters of coolants on DWTB have been given. The velocity of liquid metal LiPb is optimized on the conditions of various operations and power density on the basis of the model of power balance. The computational fluid dynamics code is selected to simulate liquid metal LiPb flow and optimize the typical thermal-hydraulic parameters.

**Key words:** fusion; sub-critical reactor; dual-cooled waste transmutation; blanket; thermal-hydraulics

收稿日期: 2004-01-09; 修回日期: 2004-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10175067, 10175068, 10375067); 中科院知识创新工程项目资助

作者简介: 汪卫华(1965—), 男, 安徽人, 副教授, 1993 年获军事科学院硕士学位, 现为中科院等离子体物理研究所博士生, 从事聚变反应堆设计研究

## 0 引言

聚变中子源驱动的次临界堆系统(FDS)利用外源中子进入到双冷嬗变包层(DWTB),实现生产核燃料、处理高放核废料、增殖能量、产氦等目的,是一种最具潜力的聚变早期应用途径,有关该系统的概念设计参见文献[1,2]。

DWTB是FDS-I最具特色的关键部件,系统多功能的实现很大程度上取决于包层设计与制造。该研究根据DWTB的结构设计方案<sup>[3]</sup>,依据管道合理性布置和排热效率高的设计原则,针对热工系统进行分析设计。DWTB外包层系统热工水力设计的基本约束条件有:各区的功率密度限制;材料的极限使用温度(包括结构材料和冷却剂与相容性温度);冷却剂压力极限(包括氦气系统压力和液态金属MHD(Magnetohydrodynamic)效应);结构材料的热应力限制;包层系统的热转换效率等。

依据功率平衡模型对氦气系统在不同工况时液态LiPb流速进行计算优化。在此基础上,参考欧洲双冷(DC)、先进双冷(A-DC)包层热工系统的设计特点<sup>[4]</sup>,对两种典型工况时氦气系统和液态LiPb系统的热工水力参数进行了设计。采用三维计算流体力学软件重点对FDS-I的DWTB外包层模块第一壁和重金属区的液态LiPb流场进行数值计算分析;并给出优化的典型热工水力参数。

## 1 热工参数设计

### 1.1 功率平衡模型

液态LiPb系统排热加氦气系统排热的总能力等于包层内产生核热的功率平衡关系,是热工参数设计和优化的基础。为了便于分析问题,计算分析模型仅考虑包层的第一壁(FW)和重金属(HM)区,包层简化模型为一个长方体,如图1所示,主要参数见表1。

### 1.2 工况优化

参考国际上液态LiPb包层和DC、A-DC包层热工方案,设计的三种典型氦气工况分别

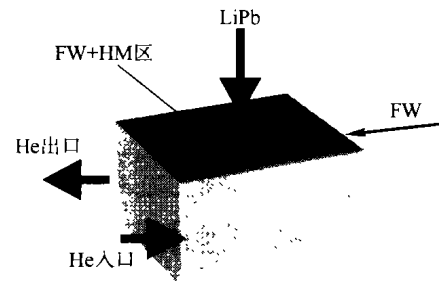


图1 包层模块简化模型图

Fig. 1 Schematic of blanket model

为:工况1,氦气系统带走FW表面热流 $Q_{FW}$ 和结构核热 $Q_{结构}$ ;工况2,氦气系统平均工作压力为8 MPa,平均流速为40 m/s;工况3,平均工作压力为10 MPa,平均流速为50 m/s<sup>[4]</sup>。

在简化包层模型中,以假设的中子学为条件来设定包层液态LiPb平均功率密度为 $q$ , $V_{LiPb}$ 为液态LiPb流速, $V$ 为包层中液态LiPb体积, $Q_{He}$ 和 $Q_{LiPb}$ 分别为氦气和液态LiPb流动所带走的热量,依据功率平衡关系有:

$$Q_{He} + Q_{LiPb} = Q_{FW} + Q_{结构} + qV \quad (1)$$

氦气质量流率见式(2),氦气流速见式(3),液态LiPb质量流率见式(5),液态LiPb流速见式(6)。

$$\dot{m}_{He} = Q_{He} / (C_P \Delta T_{He}) \quad (2)$$

式中: $\dot{m}_{He}$ 为氦气质量流率; $C_P$ 为氦气比热; $\Delta T_{He}$ 为氦气进出口温差。

$$V_{He} = \dot{m}_{He} / (A \rho_{He}) \quad (3)$$

式中: $V_{He}$ 为氦气流速; $A$ 为氦气流道总截面; $\rho_{He}$ 为氦气密度。

$$\rho_{He} = 48.091 \times 10^5 P(\text{Pa}) / T(\text{K}) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{LiPb} = \frac{Q_{LiPb}}{C_P \Delta T_{LiPb}} \quad (5)$$

式中: $\dot{m}_{LiPb}$ 为液态LiPb质量流率; $C_P$ 为液态LiPb比热; $\Delta T_{LiPb}$ 为液态LiPb进出口温度差。

$$V_{LiPb} = \dot{m}_{LiPb} / (A \rho_{LiPb}) \quad (6)$$

式中: $A$ 为液态LiPb流道总截面; $\rho_{LiPb}$ 为液态LiPb密度。

表 1 包层模块简化模型主要参数

Table 1 Main parameters of schematic blanket module

参数名称	参数值	计量单位
包层模型高度	6	m
包层模型宽度(FW+HM)	0.51	m
包层模型长度	0.7	m
FW 表面积	4.2	m <sup>2</sup>
包层模型体积	2.142	m <sup>3</sup>
FW 与 HM <sub>1</sub> 之间管道截面	17×15	m <sup>2</sup>
管道数	300	个
该组管道总面积	0.076 5	m <sup>2</sup>
HM 区每两组间管道截面	15×15	m <sup>2</sup>
管道数	900	个
三组管道总面积	0.202 5	m <sup>2</sup>
占空比(总面积/FW 表面)	6.64 %	
氦气系统	结构占整个包层比例	10 %
	FW 表面热流密度	0.1 MW/m <sup>2</sup>
	结构核热平均功率密度	5 MW/m <sup>3</sup>
	比热	5 200 J/(kg·K)
	平均密度(400 °C, 8 MPa)	5.7 kg/m <sup>3</sup>
	平均密度(400 °C, 10 MPa)	7.1 kg/m <sup>3</sup>
	进、出口处温度差	200 K
	管道总面积	0.321 m <sup>2</sup>
液态 LiPb	平均密度(710 K)	9 255 kg/m <sup>3</sup>
系统	比热	190 J/(kg·K)
	进、出口温度差	200 K

由式(1)~(6)得到氦气系统三种典型工况时,包层液态 LiPb 功率密度与流速的关系,如图 2 所示,解析关系见式(7)~(9)。

$$\text{工况 1: } q \approx 58.6 V_{\text{LiPb}} \quad \text{MW/m}^3 \quad (7)$$

$$\text{工况 2: } q \approx 33.4 + 58.6 V_{\text{LiPb}} \quad \text{MW/m}^3 \quad (8)$$

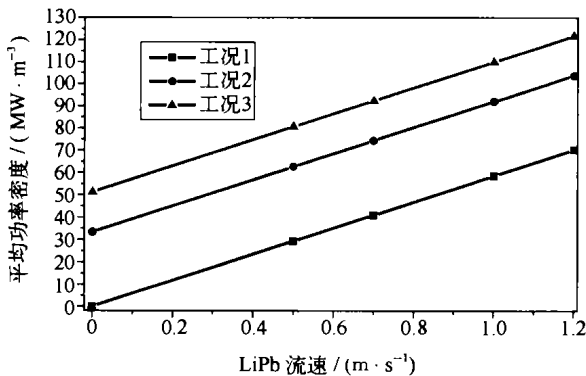


图 2 典型工况时液态 LiPb 功率密度与流速关系

Fig. 2 The liquid LiPb velocity dependent on power density at the conditions of various operations

$$\text{工况 3: } q \approx 51.3 + 58.6 V_{\text{LiPb}} \quad \text{MW/m}^3 \quad (9)$$

由功率平衡模型对氦气在三种典型工况时的计算优化结果可知,DWTB 氦气系统的排热能力较强,在工况 2 和工况 3 时包层均可达到较理想的功率密度和较低的液态 LiPb 流速。这与国际上同类型液态 LiPb 包层热工参数大致相当,以下热工参数设计以这两种典型工况为基准。

### 1.3 氦气系统参数设计

由文献[3]可知,DWTB 的结构从径向分别由 FW、HM 区和裂变产物(FP)嬗变区组成,其中由内向外 HM 区分为 HM<sub>1</sub>、HM<sub>2</sub>、HM<sub>3</sub>、HM<sub>4</sub> 四个区,FP 分为 FP<sub>1</sub>、FP<sub>2</sub>、FP<sub>3</sub> 三个区。

为了充分提高氦气系统的载热能力,尽可能减小 HM 区液态 LiPb 的排热份额,降低液态 LiPb 的流速,减少 MHD 影响,提高包层功率密度,在 FW 上,FW 与 HM<sub>1</sub> 区之间及其他的 HM 各区之间,设计了四组矩形氦气冷却管道,分别命名为 He<sub>1</sub>、He<sub>2</sub>、He<sub>3</sub>、He<sub>4</sub>,带走 FW 热流、结构、FP 区核热和 HM 各区部分核热。由文献[3]可知,250 °C 氦气从模块顶部进入包层,沿后部的氦气母管向下流动,至模块下部改变方向流入后部氦气联箱,再进入侧壁(SW)的平行流道,在侧壁的另一端流出,控制出口温度约为 450 °C。在裂变产物处理区(三个 FP 区)选择氦气从联箱的一端隔板上的气孔进入,从另一端气孔流出。三个 FP 区氦气相向流动,入口温度约为 250 °C,出口温度约为 450 °C。

两种工况时氦气系统具体的热工设计参数见表 2,其中 He<sub>1</sub> 和 He<sub>2</sub> 在两种工况时,除带走 FW 热流和结构核热外,还分别带走 HM<sub>1</sub> 区核热的 60 % 和 93 % 与 HM<sub>2</sub> 区核热的 38 % 和 60 %,这是假设了 HM<sub>1</sub> 和 HM<sub>2</sub> 区的平均功率密度为 100 MW·m<sup>-3</sup>,HM<sub>3</sub> 和 HM<sub>4</sub> 区的平均功率密度为 10 MW·m<sup>-3</sup>。

He<sub>3</sub> 和 He<sub>4</sub> 带走结构核热, HM<sub>2</sub>、HM<sub>3</sub>、HM<sub>4</sub> 和 FP 区部分核热。这两个系统设计参数还具有较大的余量,原因是钷增殖区 HM<sub>3</sub> 和 HM<sub>4</sub> 本身功率密度低,另外液态 LiPb 要缓慢流动提取氦带走部分核热。考虑 LiPb 的熔点

表 2 DWTB 热工水力设计参数

Table 2 Thermal-hydraulic parameters of DWTB

冷却剂入口处温度/℃		250			
冷却剂出口处温度/℃		450			
进、出口处温度差/℃		200			
平均压损/MPa		~0.1			
氦气系统参数	FP <sub>1</sub> 区流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.3			
	FP <sub>2</sub> 区流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.2			
	FP <sub>3</sub> 区流速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.1			
氦气子系统		流速/(m·s <sup>-1</sup> )	质量流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	带走核热/MW	
He <sub>1</sub> 系统	工况 2	40	17.4	18.1	
	工况 3	50	27.2	28.2	
He <sub>2</sub> 系统	工况 2	40	15.4	16	
	工况 3	50	24	24.9	
He <sub>3</sub> 系统	工况 2	25	9.6	10	
	工况 3	20	9.6	10	
He <sub>4</sub> 系统	工况 2	9	3.5	3.6	
	工况 3	7	3.5	3.6	
液态 LiPb 各区		HM <sub>1</sub>	HM <sub>2</sub>	HM <sub>3</sub>	HM <sub>4</sub>
功率密度/(MW·m <sup>-3</sup> )		100		10	
总核热/MW		43.72	42	4.3	4.3
He 带核热/MW	工况 2	26.1	16	3.6	3.3
	工况 3	40.6	24.9		
液态 LiPb 系统参数	LiPb 带核热/MW	工况 2 17.62	26	0.7	1
		工况 3 3.12	17.1		
LiPb 质量流率/(kg·s <sup>-1</sup> )	工况 2	464	676	19	27
	工况 3	82	450		
LiPb 流速/(m·s <sup>-1</sup> )	工况 2	0.7	1.0	0.03	0.04
	工况 3	0.2	0.7		

(235 °C)以及 LiPb 与结构材料 CLAM 钢的相容性(480 °C)要求,设计氦气的进、出口温度与液态 LiPb 的进、出口温度相一致,入口温度为 250 °C,出口温度约为 450 °C。

### 1.4 液态 LiPb 系统参数设计

液态 LiPb 系统 HM 区包括 2 个 MA 区(HM<sub>1</sub>、HM<sub>2</sub>)和 2 个 U 区(HM<sub>3</sub>、HM<sub>4</sub>)。选择 LiPb 作为冷却剂和氦增殖材料循环流动带走核热。HM<sub>1</sub>区、HM<sub>3</sub>区液态 LiPb 自顶部总管进入,自上而下流动。HM<sub>2</sub>区、HM<sub>4</sub>区 LiPb 自底部进入,自下而上流动。液态 LiPb 入口温度为 250 °C,控制出口温度约为 450 °C。该冷却方式既可从整体上均衡包层结构温度分布,减小热应力,又提高了冷却效率。

两种工况时液态 LiPb 系统具体的热工设

计参数见表 2。两种工况时液态 LiPb 分别带走 HM<sub>1</sub>区核热的 40 %和 7 %,HM<sub>2</sub>区核热的 62 %和 40 %。设计的 HM<sub>1</sub>、HM<sub>2</sub>区液态 LiPb 的平均流速均在 1 m/s 以下,较好地满足了 MHD 要求。

## 2 典型区域数值模拟

根据热工参数设计,FW、HM<sub>1</sub>和 HM<sub>2</sub>区的核热功率密度较包层其他区高 10 倍以上,核热的产生与排热主要集中在此三个区域,因此 DWTB 包层的热工计算与优化应重点针对此区域进行。采用商用三维流体力学数值模拟软件对包层 FW 和 HM<sub>1</sub>区液态 LiPb 的流场进行数值模拟计算,考察工况 2 时液态 LiPb 的流场和温度场,优化其流速、包层温度等热工参数。

### 2.1 模型与假设

考虑到包层在径向-环向是对称的,它包括两个矩形流道(92 mm×90 mm)和一个梯形流道(92 mm×(上 90 mm+下 101 mm)),模型总高 6 m,长 335 mm,宽 130 mm。采用四面体单元网格的三维有限体积计算模型,单元数为 1 876 994。

液态 LiPb 在流道内流动,其 Re 数约为 10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>量级,计算采用标准 k-ε 湍流模型,在三维稳态分析中,边界层采用近壁函数处理<sup>[5]</sup>。液态 LiPb 在强磁场中流动的 MHD 效应对流场及温度的影响另有论述,也可参见后续发表的论文。

### 2.2 边界条件

液态 LiPb 从顶部自上而下流动,入口采用速度边界,入口温度 523 K,出口为压力边界,加载重力项。液态 LiPb 和结构材料低活化钢如中国低活化马氏体钢(CLAM)的密度、比热、热导率、粘性系数数值加载时均随温度而变化<sup>[7~9]</sup>。

### 2.3 模拟计算

液态 LiPb 在 HM<sub>1</sub>区的入口速度为 0.7 m/s,核热功率密度为 100 MW/m<sup>3</sup>,氦气系统为工况 2 条件下的计算结果如图 3 所示。结果显示了 FW 和 HM<sub>1</sub>区结构最大温度约为 705 K,位于包层的出口处,包层结构最高温度符合

(下转第 92 页,continued on page 92)

cooled Waste Transmutation Blanket for the FDS [J]. Fusion Eng. Design, 2002, 61~62:455~459.

- [6] 汪卫华, 等. 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层热工水力学参数设计与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1).
- [7] 黄群英, 等. 聚变堆低活化马氏体钢发展综述[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1).

(上接第 96 页, continued from page 96)

液态 LiPb 与结构材料相容性要求。从图中的温度场还可以看出, HM<sub>1</sub> 区各流道形状对 LiPb 的流动特性有较大的影响, 从梯形流道至两个矩形流道, 存在温度梯度, 引起各流道的压力降差别, 也会引起应力分布不均匀。

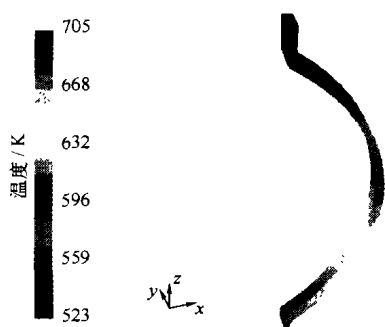


图 3 包层模块温度场

Temperature field of blanket module

以液态 LiPb 出口温度 723 K 为约束条件, 图 4 给出了由数值计算得出的 HM<sub>1</sub> 区功率密度分别为 80~120 MW/m<sup>3</sup> 时, 液态 LiPb 流速分别取 0.5、0.7 和 1.0 m·s<sup>-1</sup> 时的优化设计窗口。

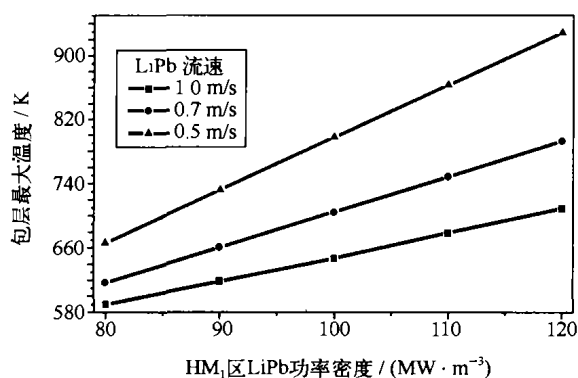


图 4 包层温度随 HM<sub>1</sub> 区功率密度变化关系

Fig. 4 Temperatures dependent on power density on blanket

### 3 结论

该研究针对 FDS 双冷嬗变包层热工水力系统进行了设计优化。根据功率平衡对不同工况时的液态

- [8] Wang Hong-yan, et al. Preliminary Analysis of Liquid Metal MHD Pressure Drop in the Blanket for the FDS [J]. Plasma Physics and Technology, 2002, 4, (5).
- [9] Ke Y, et al. MHD Simulation of the Liquid Metal/Helium gas Dual-cooled Waste Transmutation Blanket for FDS [J]. Fusion Eng. Design, 2003, 69:431~435.

LiPb 的流速进行计算优化, 并确定两种典型工况来设计氦气系统和液态 LiPb 系统的热工水力参数。对包层的关键部件第一壁和高功率密度 (HM<sub>1</sub>) 区进行了数值模拟, 得到了液态 LiPb 的流场和温度场。根据包层设计原则, 设定液态 LiPb 典型流速和功率密度, 计算优化了液态 LiPb 功率密度、流速与包层温度的关系。优化结果显示当液态 LiPb 流速为 0.7 m/s, HM<sub>1</sub> 区功率密度为 100 MW·m<sup>-3</sup> 时, DWTB 包层中的液态 LiPb 的进出口温差小于 200 K, 压力降约为 0.1 MPa<sup>[6]</sup>, 较好地满足了包层结构材料最高温度限制以及结构材料与冷却剂相容性的要求。下一步须对包层的电磁力、热应力、机械应力等进行耦合计算, 以及事故状态下的热工水力学分析研究等。

### 参考文献:

- [1] 吴宜灿, 等. 聚变驱动次临界堆概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1).
- [2] Wu Y C. The fusion-driven hybrid system and its material selection [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307~311, 2, 1629~1636.
- [3] 柯严, 等. 聚变驱动次临界堆双冷嬗变包层结构设计与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1).
- [4] Thermal-hydraulics design and thermo-mechanics analysis of two European breeder blanket concepts for DEMO [R]. 1995.
- [5] Wang Weihua, et al. Fusion Driven Sub-Critical Dual-cooled Waste Transmutation Blanket: Design and Analysis [J]. Plasma Science & Technology, 2003, 5(6):2077~2083.
- [6] WANG Hong-yan, et al. Preliminary Analysis of Liquid Metal MHD Pressure Drop in the Blanket for the FDS [J]. Plasma Science and Technology, 2002, (5).
- [7] Huang Q Y, et al. Overview on the development of low activation martensitic steel for Fusion engineering [J]. Nuclear Science and Engineering, 2003.
- [8] Tavassolia A A F, et al. Materials design data for reduced activation martensitic steel type F82H [J]. Fusion Eng. 2002, 61~62:617~628.
- [9] Karditsas P J, et al. Thermal and Structural Properties of Fusion Related Materials. UKAEA FUS 294 1995.