

# 聚变驱动次临界堆嬗变包层双流场 三维数值模拟与分析

汪卫华, 吴宜灿, 王红艳, 柏云清, 陈红丽, 柯严

(中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**采用流体动力学数值模拟软件对聚变次临界堆双冷嬗变包层高功率密度区(FW、HM<sub>1</sub>)液态金属LiPb和氦气流场进行三维数值模拟,考察双流场温度分布、LiPb向氦气传热热流密度场等,为聚变次临界堆热工水力学设计提供决策依据。

**关键词:**次临界堆;双冷嬗变包层;双流场;数值模拟

**中图分类号:**TL62.2 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2004)03-0264-05

## Three-dimension numerical simulation and analysis of dual-flow fields in the dual-cooled waste transmutation blanket for the fusion-driven sub-critical system

WANG Wei-hua, WU Yi-can, WANG Hong-yan,  
BAI Yun-qing, CHEN Hong-li, KE Yan

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

**Abstract:** The flow dynamic code is used to simulate 3D flow fields of liquid metal LiPb and Helium gas, the temperature distribution of dual-flow fields and heat flux fields from LiPb to helium gas in the high power density zones (FW, HM<sub>1</sub>) of the DWTB (Dual-cooled Waste Transmutation Blanket) for FDS (fusion-Driven sub-critical system). The results will provide the decision support for farther thermal hydraulic design of FDS.

**Key words:** sub-critical reactor; dual-cooled waste transmutation blanket; dual-flow fields; numerical simulation

收稿日期:2004-07-;修回日期:2004-08-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19385004、19985004、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,博士生,副教授,1993年获硕士学位,从事反应堆设计研究

## 0 引言

依据功率平衡文献[1]给出了聚变次临界堆双冷嬗变包层(DWTB)的热工水力参数设计方案。根据该设计方案  $HM_1$  (重金属)和  $HM_2$  区<sup>[2]</sup>核热功率密度较包层其他区高 10 倍以上, 达  $100 \text{ MW/m}^3$ , 核热的产生与排热主要集中在该区域, 因此 DWTB 热工问题的关键是优化处理高功率密度区的核热。

DWTB 热工水力设计了两种备选方案来处理高功率密度区核热。方案 I, 氦气仅带结构区和第一壁(FW)核热, 液态金属 LiPb 排出  $HM_1$  区核热; 方案 II,  $HM_1$  区核热由氦气和 LiPb 共同带走。通过功率平衡评估, 两种方案中  $HM_1$  区功率密度均可设计到  $100 \text{ MW/m}^3$ , 但方案 I 时要使  $HM_1$  区温度差小于  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , LiPb 流速就不能低于  $1.7 \text{ m/s}$ , 高流速 LiPb 对结构腐蚀及 MHD 压降大是该方案的缺点, 必须研究具有电绝缘、绝热能力的 LiPb 流道插件来加以解决。基于方案 I 的缺陷, 方案 II 试图通过最大限度地挖潜氦气系统最大载热能力来更多地携带  $HM_1$  区核热, 以此来降低 LiPb 流速。根据功率平衡, 方案 II 时 LiPb 流速为  $0.7 \text{ m/s}$ , 从  $HM_1$  区向 FW 氦气传递的热流密度约为  $3 \text{ MW/m}^2$ 。对于如此高的热流, 在工程上能否实现是该方案的关键, 而要解决此问题, 就必须模拟真实物理条件下由  $HM_1$  区向 FW 氦气传热情况。因此, 本文采用三维流体动力学数值模拟(CFD)软件在先进进行 LiPb 单流场模拟的基础上, 再对 FW +  $HM_1$  区液态金属 LiPb 和氦气流场进行三维数值模拟计算, 考察双流场条件下高功率密度 LiPb 区向冷却剂氦气的传热情况, 即三维热流密度场分布与温度场分布, 据此来确定高功率密度区 LiPb 的流速与功率密度的关系, 为热工水力方案设计及参数优化提供依据。

## 1 液态 LiPb 单流场数值模拟

方案 I 液态金属 LiPb 单流场数值模拟的目的是考察全模型条件下 DWTB 的温度场分布和 LiPb 流场。

### 1.1 计算模型

图 1 所示为 DWTB 结构设计图<sup>[2~4]</sup>, 根据结构图给出的 FW +  $HM_1$  区结构设计参数如表 1 所示<sup>[1]</sup>。由于包层环向对称, 为减少计算量, 如图 2 所示, 取 FW +  $HM_1$  区全高度模型的一半作为计算模型。

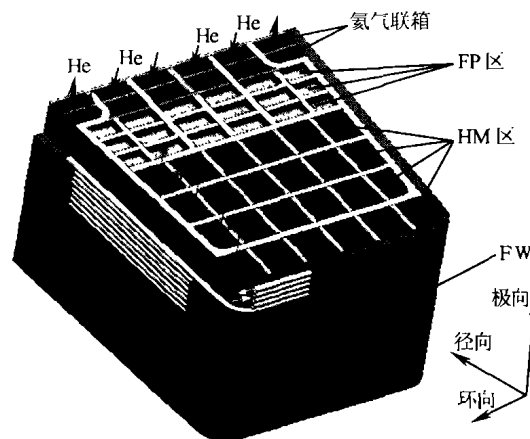


图 1 DWTB 模块  
Fig. 1 DWTB module

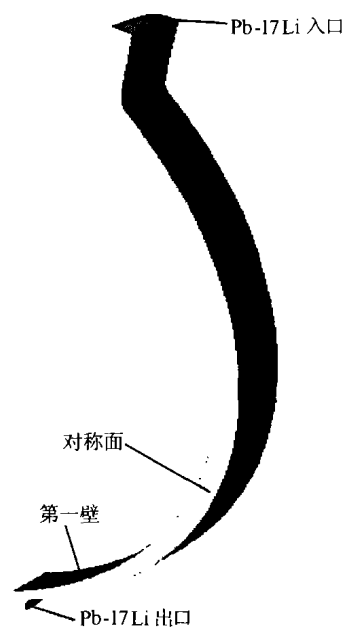


图 2 方案 I 计算模型  
Fig. 2 Calculation Model of Scheme I

### 1.2 基本假设与边界条件

假设氦气带走 FW 热流和全部结构核热;  $HM_2$  区与  $HM_1$  区之间不设计氦气冷却管道; 四周绝热。参考中子学设计, 取典型边界条件

为:HM<sub>1</sub>区功率密度为 100 MW/m<sup>3</sup>;包层结构平均功率密度为 5 MW/m<sup>3</sup>。分别考察两种情况:情况 1 为氦气仅带走结构核热,LiPb 入口温度为 250 °C,LiPb 流速为 1.7 m/s;情况 2 是 LiPb 流速为 0.7 m/s,功率密度仍为 100 MW/m<sup>3</sup>。

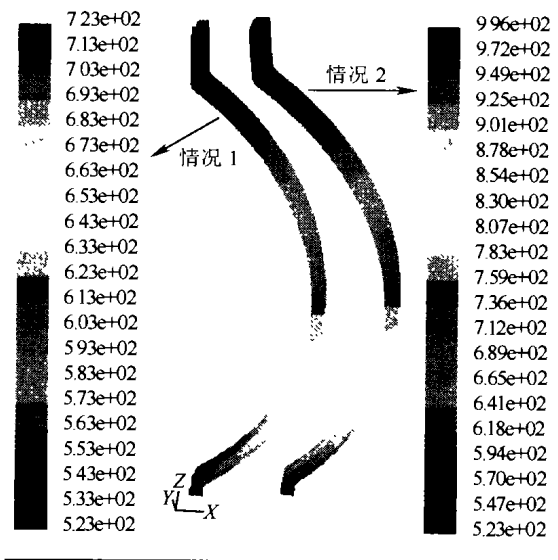
表 1 FW+HM<sub>1</sub>区结构设计参数  
Table 1 Structure parameters of FW+HM<sub>1</sub> zone

包层参数	设计参数值
FW 表面热流密度/(MW·m <sup>-2</sup> )	0.1
FW 厚度(径)/mm	30
FW 面向等离子体壁厚/mm	5
FW 与 MA 区氦气壁厚/mm	8
FW 氦气流道截面/mm <sup>2</sup>	17(径)×15(极)
FW 氦气隔板厚度(极)/mm	5
HM <sub>1</sub> 区 LiPb 矩形流道/mm <sup>2</sup>	92(径)×90(环)
HM <sub>1</sub> 区 LiPb 梯形流道/mm <sup>2</sup>	92(径)×(上 90,下 101)(环)
LiPb 流道隔板/mm	10

### 1.3 结果与分析

两种情况下的温度场分布如图 3 所示。HM<sub>1</sub>区 LiPb 100 MW/m<sup>3</sup>的高功率密度全部由 LiPb 自身流动带走,情况 1 时 LiPb 最高温度为 450 °C,进出口温度差为 200 °C;情况 2 时 LiPb 最高温度为 723 °C,进出口温度差为 473 °C。

情况 1 表明氦气仅带结构核热条件下, HM<sub>1</sub>区 LiPb 流速需达到 1.7 m/s,才能满足 LiPb 温差小于 200 °C 的要求。情况 2 说明,为了减小 LiPb 流动的 MHD 压降,降低其对结构材料的腐蚀,需要最大限度地发挥氦气系统的排热能力,从而降低 HM<sub>1</sub>区 LiPb 流速。因此依据功率平衡提出热工水力学方案 II,通过调整氦气系统设计,增加包层结构上氦气管道,提高氦气流速等方法来尽量提高氦气系统的排热份额,依据文献[1]的设计,氦气系统可携带 HM<sub>1</sub>区约 60%的核热,LiPb 系统携带 HM<sub>1</sub>区 40%的核热,该方案 HM<sub>1</sub>区 LiPb 等效功率密度仍然为 100 MW/m<sup>3</sup>,LiPb 的流速可降至 0.7



Contours of Static Temperature/K

图 3 两种情况时 FW+HM<sub>1</sub>温度场  
Fig. 3 Temperature fields of FW+HM<sub>1</sub> for the two cases

m/s。此情况下,根据功率平衡估算,由 HM<sub>1</sub>区向 FW 氦气传热的热流密度不低于 3 MW/m<sup>2</sup>。虽然功率平衡说明氦气系统具备较高的携带核热能力,但实际情况能否满足将成为该方案的关键,下面将模拟真实物理条件下方案 II 时由 HM<sub>1</sub>区向 FW 氦气传热情况。

## 2 双流场数值模拟

在方案 I 液态金属 LiPb 单流场数值模拟的基础上,根据温度场分布,选择 DWTB 极向上 FW 和 HM<sub>1</sub>区 LiPb 出口典型段作为分析模型,目的是考察双流场条件下液态金属 LiPb 向 FW 氦气传热的热流密度场与温度分布,据此确定 HM<sub>1</sub>区 LiPb 的核热功率密度和流动速度。

### 2.1 计算模型

根据 DWTB 结构建立的三维 CFD 模型如图 4 所示,为了分析问题的需要,对双流场数值模拟模型进行了简化和假设:①模型综合考虑了第一壁氦气流场和重金属 HM<sub>1</sub>区 LiPb 流场;②结构上核热和液态金属核热均采用假设的典型中子学计算值;③由于 DWTB 全模型体积太大,网格后模型的单元数过大,计算机硬件

难以支持,且运算耗时过长,因此在单流场模拟的基础上取包层下部 LiPb 出口段两个氦气流道作为计算模型。

## 2.2 基本假设与边界条件

假设  $HM_1$  与  $HM_2$  区之间无热流传递(绝热边界,即  $HM_1$  区与  $HM_2$  区之间不设计氦气冷却管道)。边界条件为  $HM_1$  区实际功率密度为  $100 \text{ MW/m}^3$ ;包层结构平均功率密度为  $5 \text{ MW/m}^3$ ;LiPb 入口温度取液态 LiPb 单流场数值模拟计算结果;模型选择 LiPb 出口端;其他条件参见图 4。

## 2.3 结果与分析

### 1) $HM_1$ 区向 FW 氦气传热热流密度

图 5 显示了由  $HM_1$  区向 FW 氦气传热的热流密度的数值模拟结果,图中最大值为  $-0.816 \text{ MW/m}^2$ ,位于氦气流道的转弯段。由图估算的热流密度平均值约为  $-0.5 \text{ MW/m}^2$ ,负号表示热量由  $HM_1$  区向外传递。由模拟结果可以得出,通过功率平衡所计算的由  $HM_1$  区向 FW 及周围传递的热流密度为  $3 \text{ MW/m}^2$ ,实际平均只能达到约  $0.5 \text{ MW/m}^2$ 。其物理原因一是  $HM_1$  区与 FW 氦气之间温度梯度无法足够高至满足传递预定热流( $3 \text{ MW/m}^2$ )的要求;二是两者之间的结构壁太厚而使热阻增大。模拟结果表明方案 II 条件下氦气最多只能携带

$HM_1$  区 10% 的核热而不是功率平衡所估计 60%。<sup>[1]</sup>模拟结果还说明虽然氦气系统具有较大的携带  $HM_1$  区核热能力,但由于传热不能满足要求,方案 II 时  $HM_1$  区核热功率密度不能大于  $50 \text{ MW/m}^3$ 。因此,要使  $HM_1$  区功率密度达到  $100 \text{ MW/m}^3$ ,LiPb 出口温度尽可能高而流速尽可能低时,需要设置绝缘隔板插件,保证高功率密度 LiPb 区与结构之间几乎绝热,或传递很少的热量,该方法需要研发耐高温、强度高、绝热性优良的流道插件。

### 2) $HM_1$ 区与 $HM_2$ 区之间边界条件的影响

以上分析是  $HM_1$  区与  $HM_2$  区之间绝热边界的数值模拟结果,当两区之间设计了氦气冷却管道<sup>[1]</sup>,假设  $HM_1$  区 LiPb 向其传递的热流密度也为  $0.5 \text{ MW/m}^2$ ,其他条件相同时得到改变热流边界条件对模拟结果的影响为:①最高温度从  $723 \text{ K}$  降为  $718 \text{ K}$ ,说明在  $HM_1$  区与  $HM_2$  区之间的氦气流动可带走少部分 LiPb 核热,LiPb 温度仅降低  $5^\circ\text{C}$ ;② $HM_1$  区向 FW 氦气传热的热流密度最大值由  $-0.816 \text{ MW/m}^2$  降为  $-0.806 \text{ MW/m}^2$ ,表明由于在两个高功率密度区之间增设氦气系统带走部分核热而对  $HM_1$  区向 FW 氦气传热热流密度产生影响,约为  $0.01 \text{ MW/m}^2$ 。

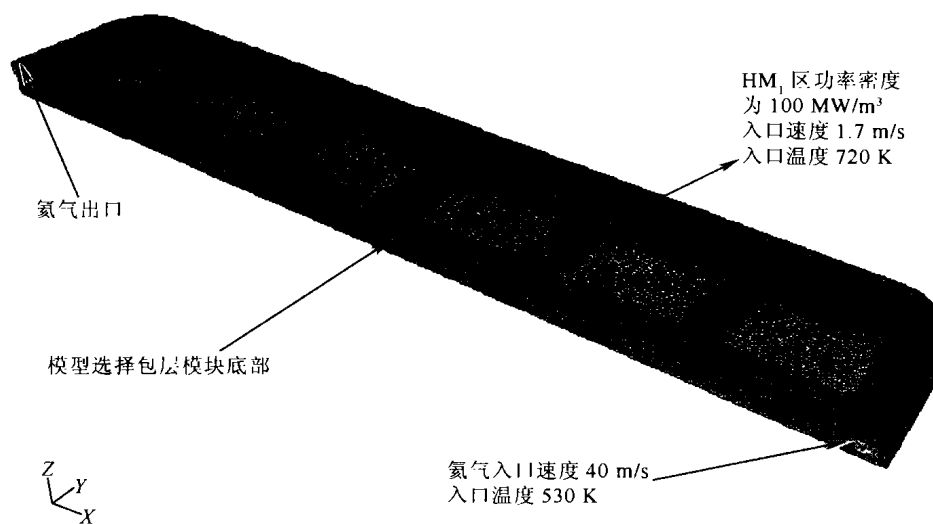
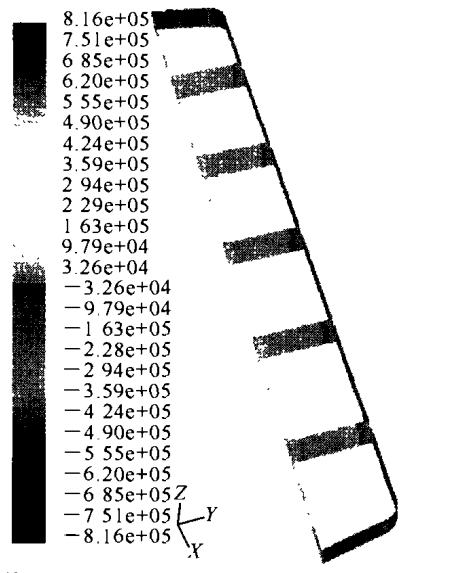


图 4 方案 II 三维 CFD 模型

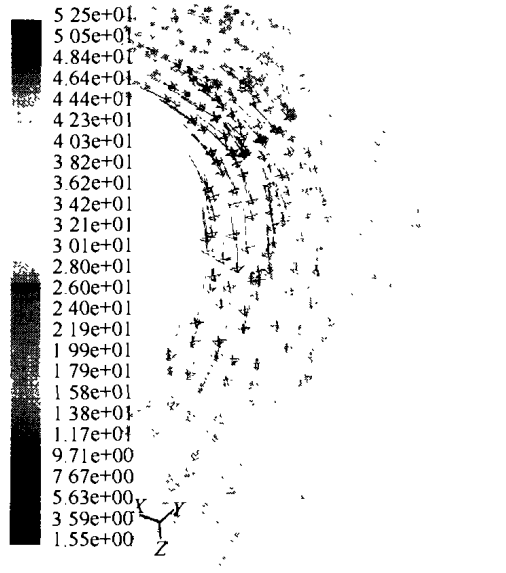
Fig. 4 3D CFD model of scheme II



Contours of Total Surface Heat Flux/(W/m<sup>2</sup>)

图5 HM<sub>1</sub>区向FW传热热流密度分布

Fig. 5 Heat flux distribution from HM<sub>1</sub> zone to FW



Velocity Vectors Colored By Velocity Magnitude/(m/s)

图6 氦气转弯段速度矢量

Fig. 6 Velocity vector of Helium gas at swerve section

### 3) 氦气流动特性

氦气在流道转弯段速度矢量如图6所示, 流场没有出现分离和旋涡, 没有出现气流因被加热或管道设计而产生气流雍塞, 说明氦气流动方案选择具有较好的流动特性。

## 3 结论

通过对双冷嬗变包层 FW+HM<sub>1</sub>区全模型液态 LiPb 单流场模拟可以得到, 当氦气仅带结构核热, 流速为 1.7 m/s 和 0.7 m/s 时, LiPb 升温分别为 200 °C 和 473 °C, 结果表明 LiPb 流速必须大于 1.7 m/s 才能满足方案 I 的设计要求; 为了确定方案 II 时 HM<sub>1</sub> 区 LiPb 的功率密度, 根据实际物理条件进行双流场数值模拟, 模拟出了 HM<sub>1</sub> 区 LiPb 向氦气传递的平均热流密度约为 0.5 MW/m<sup>2</sup>, 根据模拟结果可得到 HM<sub>1</sub> 区不设计绝缘绝热流道插件时, 进出口 LiPb 温度差小于 200 °C, LiPb 流速为 0.7 m/s 时, HM<sub>1</sub> 区功率密度不能大于 50 MW/m<sup>3</sup>。以上双流场模拟的 HM<sub>1</sub> 区 LiPb 向氦气传递的平均热流密度结果能否满足 FW 结构强度要求, 文献[5]作了进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 汪卫华, 等. 聚变驱动次临界堆 FDS 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): 93~96.
- [2] 柯严, 等. 聚变驱动次临界堆 FDS 双冷嬗变包层结构设计与分析[J]. 核科学与工程 2004, 24(1): 87~92.
- [3] 吴宜灿, 等. 聚变驱动次临界堆 FDS 概念设计研究[J]. 核科学与工程, 2004, 24(1): 72~80.
- [4] Y. C. Wu, The fusion-driven hybrid system and its material selection [J]. Journal of Nuclear Materials, 2002, 307~311(2): 1629~1636.
- [5] 柏云清, 等. 聚变次临界堆双冷嬗变包层第一壁结构热应力计算与分析[J]. 核科学与工程, 2004, 24(3): 278~282.