

# 聚变次临界堆双冷嬗变包层第一壁 结构和氦气流道优化分析

陈红丽,汪卫华,王红艳,柏云清,吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所,安徽 合肥 230031)

**摘要:**在聚变次临界堆双冷嬗变包层第一壁结构初步设计基础上,对第一壁结构尺寸和氦气流道形状进行优化分析,利用有限元分析软件对第一壁结构进行应力数值模拟,在满足结构应力及部件可靠性的前提下,给出最佳优化方案。

**关键词:**次临界堆;双冷嬗变包层;应力场;优化

**中图分类号:** TL62.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0258-0918(2004)04-0377-05

## Optimization of first wall structure and shape of helium flow channel of the dual-cooled waste transmutation blanket for the fusion driven sub-critical system

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

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

**Abstract:** On the basis of mechanic calculation and analysis of first wall (FW) structure of the dual-cooled waste transmutation blanket (DWTB) for the fusion driven sub-critical system (FDS), the dimension of the FW structure and the shape of helium flow channel have been optimized. The finite element code is used to simulate the temperature and stress field of the FW structure. The optimized scheme has been presented under the limit of structure stress and the safety of the structure parts.

**Key words:** sub-critical system; dual-cooled waste transmutation blanket; stress field; optimization

**收稿日期:** 2004-10-14; **修回日期:** 2004-11-09

**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的资助

**作者简介:** 陈红丽(1968—), 女, 安徽人, 副教授, 1989年毕业于西安交通大学无线电专业, 现为中科院等离子体物理研究所博士生, 从事聚变堆电磁分析研究

## 0 引言

双冷嬗变包层(DWTB)是聚变驱动次临界堆(FDS-I)的关键部件<sup>[1,2]</sup>,而第一壁(FW)又是面向高温等离子体的重要部件,一方面受表面热流和高结构核热作用,另一方面,相邻HM<sub>1</sub>(重金属区)和HM<sub>2</sub>区核热功率密度设计值高达100 MW/m<sup>3</sup><sup>[3]</sup>,因此FW结构设计不仅有利于氦气冷却系统带走FW热流和结构核热,而且要求尽可能多地带走HM<sub>1</sub>的核热<sup>[4]</sup>。根据文献[5]DWTB第一壁结构热应力计算与分析,在典型氦气系统及热载荷情况下,FW氦气带走HM<sub>1</sub>区的平均热流密度0.5 MW/m<sup>2</sup>时,结构应力已达399 MPa,主要集中在方形流道转弯处。因此为了提高氦气携热能力,减少最大结构应力,需要进一步优化FW结构和氦气流道形状。

本文在DWTB热工水力学参数设计<sup>[3]</sup>、双流场三维数值模拟与分析<sup>[4]</sup>及DWTB第一壁结构热应力计算与分析<sup>[5]</sup>的基础上对FW的前壁(FW面向等离子区的结构壁厚)、后壁(FW面向HM区的结构壁厚)、隔板厚度和氦气流道形状与尺寸进行优化。参考国际上主要氦气冷却FW结构设计参数(见表1)。利用有限元分析软件对FW结构进行数值模拟,在满足结构温度、结构应力及部件可靠性的前提下,在考虑电磁力的影响下,给出最佳优化方案。

表1 国际上主要氦气冷却FW设计参数

Table 1 Design parameters of global main

	He-cooled FW structure			
	HCLL	A-HCPB	A-DC	ARIES-ST
前壁	4	5	4	3
隔板	5	6	4	4
后壁	7	6	10	10
FW厚度	25	25	44	33
He流道	14×13	14×18	30×20	20×20

## 1 基本模型

### 1.1 几何模型

图1所示为FW结构在氦气流动方向上二维截面图,由于氦气为相邻流道交叉流动,考虑到流道分布的周期性和对称性,模型选取极向

高度为两个氦气流道。基本模型设计参数前壁5 mm,隔板5 mm,后壁8 mm,氦气流道面积17 mm×15 mm,倒角半径为2 mm,在此参数模型基础上利用有限元对FW结构进行优化计算。

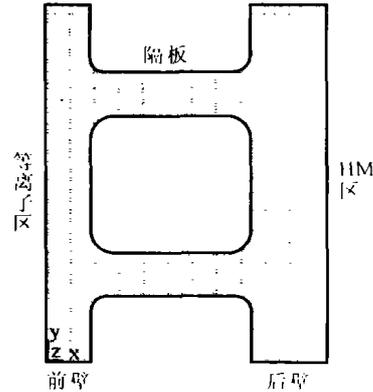


图1 FW二维截面模型

Fig. 1 2-D cross section model of FW

### 1.2 材料参数

DWTB结构材料选用RAFM低活化铁素体/马氏体钢(如中国正在发展的CLAM钢),由于CLAM钢正处于研究阶段,相关的参数还不能完全确定,计算时采用与其性能相似的F82H的参数,F82H物性参数见参考文献[6]。

### 1.3 边界条件

热学边界条件:从等离子区向第一壁热流密度 $q_{FW}$ 为0.1 MW/m<sup>2</sup>,结构核热功率密度 $q_{STRU}$ 为5 MW/m<sup>3</sup>,从HM<sub>1</sub>区向第一壁结构热流密度 $q_{HMI}$ 为0.5 MW/m<sup>2</sup>。氦气进口温度为250℃,出口温度可以由功率平衡计算得到,平均流速为40 m/s<sup>[3]</sup>。

力学边界条件:典型氦气系统压力为8 MPa。同时考虑施加在FW结构上的电磁力<sup>[7,8]</sup>。

电磁力估算如下:FDS-I的等离子体电流的设计最大值 $I_p$ 为6.25 MA,若 $I_{halo} = 40\% I_p$ ,则 $I_{halo} = 2.5$  MA,假设Halo电流与纵场垂直的方向的有效长度为1 m,而此处的环向场强 $B_T$ 约5.2 T,则Halo电流引起的电磁力<sup>[7]</sup>:

$$F_{Halo} = \frac{1}{f_{as}} I_{halo} B_T W_{eff}$$

式中: $f_{as}$ 为环向不均匀系数; $W_{eff}$ 为与纵场垂直

的方向的有效长度;  $B_T$  为环向场强。

若考虑最坏的情况,即在大环方向每处都有可能是  $I_{halo}$  集中的地方,则:

$$F_{maxHalo} = I_{halo} B_T W_{eff} = 13 \times 10^6 \text{ N}$$

若认为沿 FW 大环一圈,在有效长度 1 m 宽的范围内都作用最大力,则相当于在此区域内作用均匀分布载荷:  $q = F_{maxHalo}/A = 13 \times 10^6 / (2\pi \times 5.15 \times 1) \approx 5 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.5 \text{ MPa}$ 。在力学有限元分析中,Halo 电流所带来的电磁力,近似以均布载荷  $q$  来进行计算。

## 2 FW 厚度优化

### 2.1 FW 前壁厚度优化

在典型氦气系统及典型载荷时,改变 FW 前壁厚度,对模型进行温度和应力有限元分析,得到 FW 前壁厚度与最大温度、最大应力关系,如图 2 所示。

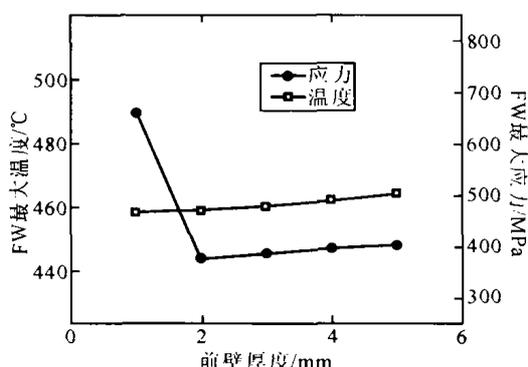


图 2 前壁厚度与最大温度和最大应力关系  
Fig. 2 Max temperature and max stress as a function of front wall thickness

结果显示,FW 最大温度分布几乎与 FW 前壁厚度无关,原因是面向 FW 热流密度不大,  $q_{FW}$  只有  $0.1 \text{ MW/m}^2$ ,最大温度分布不在此区,即使降低前壁厚度,FW 的最大温度仍旧变化不大。但最大应力随着前壁厚度的变化有很大变化,当前壁厚度很薄(小于 2 mm),最大应力大大增加,且主要分布在前壁流道转弯处,原因是此时的氦气压力在很薄的结构上产生较大的应力集中。随着厚度增加,氦气压力载荷在结构上应力比例下降,热应力随之增加,最大应力随着温度梯度的增加略有增加。从热工水力

角度,虽然厚度在 2 mm 左右的最大应力值最小,但 FW 结构对整个包层有支撑作用,考虑材料的强度以及失效概率等安全因素,参考国际主要氦气冷却 FW 结构设计参数,选择厚度 4 mm 作为前壁厚度,作为进一步分析计算的参考值。

### 2.2 FW 隔板厚度优化

隔板厚度与 FW 最大温度、最大应力关系见图 3。

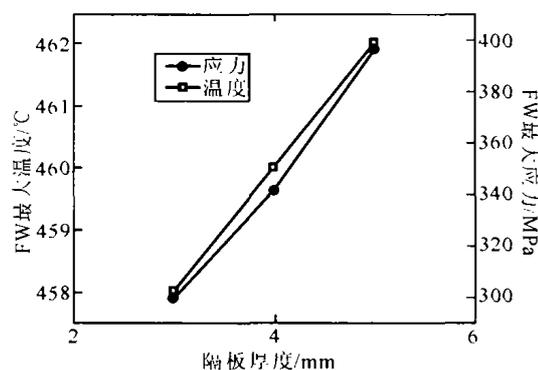


图 3 隔板厚度与 FW 最大温度、最大应力关系  
Fig. 3 Max temperature and max stress as a function of cladding thickness

结果显示,隔板厚度越薄,FW 结构上最大温度和最大应力越小。原因是隔板厚度越薄,传热效果越好,氦气带走的热量越多,同时隔板厚度的减小,相应地增大流道总截面,在保证流速不变的情况下,增大氦气质量流率。因此仅从热工水力角度来看,隔板厚度越薄越好。但由于 FW 采用 HIP 焊接技术,焊接部位主要在隔板上,因此保障结构安全牢固,隔板必须有一定的厚度,参考国际主要氦气冷却 FW 结构设计参数,选择厚度 4 mm 作为隔板厚度,作为进一步分析计算的参考值。

### 2.3 FW 后壁厚度优化

在参考文献[4]双流场三维数值模拟与分析中指出,通过功率平衡计算的由  $HM_1$  区向 FW 及周围传递的热流密度  $3 \text{ MW/m}^2$ ,而实际数值模拟结果平均只能达到  $0.5 \text{ MW/m}^2$ 。其物理原因之一是两者之间的结构壁太厚而阻碍传热。因此为了使氦气系统更多地携带  $HM_1$  区核热,降低 LiPb 速度,减少对结构的腐蚀及

MHD 压降,可以试图减小两者之间的结构壁厚。后壁厚度与 FW 最大温度、最大应力关系见图 4。

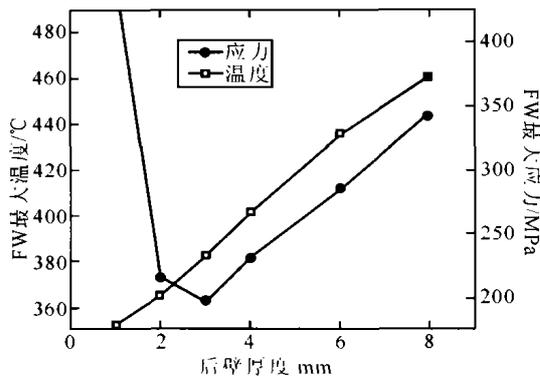


图 4 后壁厚度与 FW 最大温度、最大应力关系  
Fig. 4 Max temperature and max stress as a function of rear wall thickness

从结构温度和应力分布可以看出,FW 结构最大温度随后壁厚度减小而降低,因为此处  $HM_1$  区向 FW 氦气传热的平均热流密度很大,FW 最大温度分布在此区,厚度减小,温度随之而降。而最大应力与后壁厚度的关系出现了拐点,原因相同于应力与前壁厚度的关系。考虑 FW 的支撑作用、材料的强度及液态 LiPb 对后壁的腐蚀作用等,参考国际主要氦气冷却 FW 结构设计参数,选择 6 mm 作为后壁的参考厚度。且当后壁厚度减少到 6 mm 时,由  $HM_1$  区向 FW 氦气传热的最大热流密度约为  $0.6 \text{ MW/m}^2$ 。可见适当的后壁厚度,一方面可以减少结构最大温度和最大应力,另一方面可以增大氦气系统携带  $HM_1$  区核热的能力,进一步减小 LiPb 速度。

### 3 氦气流道形状优化

参考 DWTB 第一壁结构热应力计算与分析<sup>[5]</sup>,在保持流道截面面积不变前提下,将流道形状由方形调整为圆形,进行热及应力分析。在典型氦气系统及热载荷情况下,由有限元分析得到其最大温度为  $477 \text{ }^\circ\text{C}$ ,结构热应力最大值为  $358 \text{ MPa}$ 。与方形流道相比,温度最大值略有升高,结构热应力降低约 10%。主要原因:①由于流道截面面积不变,圆形管道对应

的水力直径  $D_h$  最大,而换热系数  $h$  与  $D_h^{0.2}$  成反比,换热系数减小,导致温度最大值升高;②圆形流道由于降低了应力集中,因此应力比方形流道有所降低。因此从结构应力角度考虑,圆形流道为更佳选择,但截面相同时圆形管道的水力直径  $D_h$  最大,势必增大 FW 厚度。

综合考虑方形流道与圆形流道的特点,在设计方形流道时,增大流道区域倒角半径,使方形流道在转弯处为圆弧形,可以减少应力集中。在典型氦气系统及典型载荷情况下,设置不同的倒角半径,对 FW 基本模型进行有限元分析,得到倒角半径与 FW 最大应力关系,如图 5 所示。随着倒角半径的增大,FW 结构最大应力减小,当倒角半径增大到 5 mm 以后,对应的最大应力变化已不显著,原因是此时流道转弯处的圆弧形变化已不明显。因此选择氦气流道倒角半径 5 mm 作为设计的参考尺寸,对应的最大应力为  $319 \text{ MPa}$ ,与倒角半径 2 mm 的基本模型最大应力相比,降低约 20%。

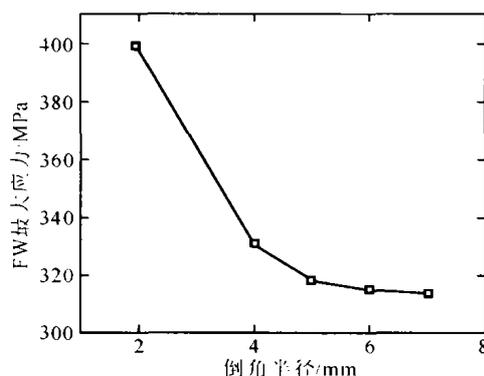


图 5 倒角半径为与 FW 最大应力关系  
Fig. 5 Max stress as a function of fillet radius

### 4 FW 结构和氦气流道优化结果

在 FW 结构厚度优化分析和氦气流道形状优化分析的基础上,提出一种优化模型。设置 FW 前壁为 4 mm,隔板为 4 mm,后壁为 6 mm,氦气流道为倒角半径是 5 mm 的方形流道,在典型氦气系统及典型载荷时,对该优化模型进行有限元分析,得到温度场及应力场分布,如图 6、7 所示。其最大温度为  $445 \text{ }^\circ\text{C}$ ,结构 von Mises 应力最大值为  $257 \text{ MPa}$ ,其中氦气压

力载荷应力约为 44 MPa, 占 17 %, 热载荷应力约为 210 MPa, 占 81 %, 电磁载荷应力约为 3 MPa, 占 2 %。可见, 综合优化 FW 结构厚度和流道形状后, FW 结构应力降低约 36 %, 结构安全性能大大提高, 且应力分散于圆弧转弯处, 减小材料使用的抗疲劳性。

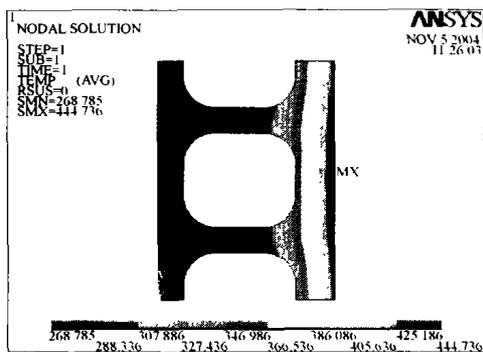


图 6 优化模型温度场

Fig. 6 Temperature field for optimized model

