

多物理场中不同结构特征 FCI 的力学行为分析*

李明健, 陈 龙, 倪明玖, 张年梅

(中国科学院大学 物理学院, 北京 100190)

摘要: 流道插件(FCI)是 ITER 中包层模块的重要部件,起到电绝缘和热绝缘的作用,FCI 的力学行为是对复杂的磁-热-流-固多物理场共同作用的响应.将有限体积法和有限元方法相结合,对包层流道中的流场、温度场以及 FCI 的应力应变场进行求解,分析了磁场效应对结构的影响,以及不同 FCI 壁厚和间隙流宽度等结构特征对包层的影响.计算结果表明,强磁场虽然会产生较强的 MHD 效应,但可以降低第一壁温度和 FCI 结构热应力;较厚的 FCI 可以降低第一壁上的最高温度,但也会增加 FCI 上的温度梯度和热应力;而较宽的间隙有利于降低第一壁上的最高温度,但会增加 FCI 的最大 Mises 应力.

关键词: 多物理场; 包层结构; 流道插件; 热应力; 流固耦合

中图分类号: O343.6 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.03.003

引 言

国际热核聚变实验堆计划(international thermonuclear experimental reactor,ITER)^[1]是为解决和平利用聚变能问题而成立的国际性合作项目.包层结构是 ITER 中的重要组成部分,其中,液态双冷锂铅包层(dual coolant lead lithium,DCLL)^[2]由于具有较好的载热能力、较高的氚增殖率和较好的循环利用能力等特点,成为许多专家和研发团队的主要研究方案.在 DCLL 中,流道插件(flow channel insert,FCI)是放置在金属流体中的关键部件,由碳化硅(SiC)复合材料制成.它作为电绝缘和热绝缘部件,一方面减少磁流体压力降带来的不利影响;另一方面减少锂铅流体向外侧铁壁的热量传递,增加能量转化效率^[3].

对于包层结构和 FCI 的分析,国内外的学者做出了很多工作.Smolentsev 等^[4]基于诱导电流公式,利用有限差分法计算了 MHD 效应.Wang(王红艳)等^[5]基于商业软件 Fluent 扩展包计算了包层中磁流体的速度分布.Ni(倪明玖)等^[6-8]发展了相容守恒格式,确保 Lorentz(洛伦兹)力作用下系统仍满足动量守恒,且电流散度为 0.Smolentsev 等^[9]分析了 MHD 压力降,热损耗以及温度分布等问题.Vitkovsky 等^[10]对包层模块进行了中子学、热工水力分析和应力分析,结构部分采用了薄壳单元和梁单元进行了简化分析,边界条件定义为弹性支撑.考虑了液压、自

* 收稿日期: 2014-09-24; 修订日期: 2014-10-30

基金项目: 国家自然科学基金(51376175);科技部 ITER 专项资助(2013GB114001)

作者简介: 李明健(1989—),男,吉林人,博士生(E-mail: mingjian.li@163.com);

张年梅(1965—),女,江西人,教授,博士(通讯作者. E-mail: nmzhang@ucas.ac.cn).

重、温度影响和电磁力带来的力和力矩,得到在正常运行状态时,最大应力约为 328 MPa,符合设计标准,同时指出在紧急事故时应力很大,需要进行弹塑性分析.Sharafat, Aoyama 等^[11]考虑中间泡沫化的 SiC 材料,采用 ANSYS 进行了流道插件的热应力分析,建立的几何模型为分段式的 FCI 以及连接 FCI 的嵌套,温度边界条件采用 MHD 计算得到的表面温度分布.Sharafat 等^[12]对流道插件进行了内置加热棒和放置在熔融的 PbLi 中的实验,测试条件较包层中恶劣,试件并未出现明显破坏;根据有限元计算得到应力分布,内置加热棒时,最大应力约为 380 MPa,出现在 FCI 结构棱角处,接近约为 400 MPa 的材料极限.Ying 和 Abdou 等^[13]提出了一种多物理场计算平台的概念(integrated multi-physics simulation predictive capability, ISPC),其中,通过结构计算,指出结构最大应力约为 450 MPa,因此包层结构仍需改进.Liu(刘松林)等^[14]使用有限元软件 ANSYS,对中国 DFLL 包层模块的典型部分进行了热-结构分析,计算了结构温度和应力分布.结果表明在安全系数较小的情况下,结构的最大温度(约 541.4 °C)和最大应力(约 394.6 MPa)均在许用范围内.

FCI 工作在高温、强磁场的环境中,同时金属流体压力会对其产生影响,因此对 FCI 的分析成为一个复杂的磁-热-流-固多物理场耦合过程.本文采用有限体积法和有限元方法,对包层流道中的流场、温度场以及 FCI 的应力、应变场进行了求解和计算.同时,较为系统地分析了不同 FCI 厚度和间隙流宽度等结构特征对包层的影响,这方面的工作在目前鲜有文献涉及.

1 计算模型和方法

1.1 计算模型

本文中的模型以 ITER 中的 DCLL 包层作为原型,进行多物理场耦合分析,并主要计算了不同结构特征对包层安全的影响.

DCLL 流道的物理模型如图 1 所示,矩形截面的流道中,液态锂铅流体缓慢通过,入口速度约 0.06 m/s,温度为 460 °C.流道的最外侧为钢制的壁面,其中布置多个小型槽道,在槽道中通过氦气进行对流换热.右图中,左侧最外层壁面为第一壁,它直接面向聚变堆中的等离子体反应中心,第一壁的温度应该保持在一定范围内(通常为 550 °C 以下),以保证结构安全.

流道插件作为热绝缘和电绝缘的部件嵌在流道中,将 PbLi 流体分隔成两部分,中间部分称为主流区域(bulk flow),外侧钢壁与 FCI 的缝隙中间部分称为间隙流区域(gap flow).FCI 由碳化硅复合材料制成,它具有耐高温、密度低、强度高等多种优点.由于 FCI 的存在,金属流体的压力降将大幅减少,使流体驱动更为容易.同时,FCI 的隔热效果将使得钢壁上的温度不致过高,保证第一壁的结构安全,还可以使出口的 PbLi 流体达到更高温度,从而增加热交换效率.

本文对于计算模型建立了空间直角坐标系,考虑到与反应堆中常用坐标系的对应关系,定义图 1 中 x 轴方向对应反应堆中的径向, y 轴方向为环向, z 轴方向(即流动方向)为极向.其中环向作用有强磁场,定义垂直于磁场方向的壁面(截面图中上下两个壁面)为 Hartmann 壁,定义平行于磁场方向的壁面(截面图中左右两个壁面)为侧壁.本文计算模型主要包括 4 个部分,从外到内分别为 Fe 壁、间隙流、FCI 和主流区域.最外侧即为 Fe 壁,不考虑细微的氦气通道,将其简化为厚度为 5 mm 的模型,并假设 Fe 壁的外侧全部被氦气包围,氦气的温度为 400 °C,对流换热系数为 4 000 W/(m²·K).Fe 壁尺寸径向(图中 x 轴)为 0.224 m,环向(图中 y 轴)为 0.324 m,流动方向长为 2 m.间隙流的宽度通常为 2 mm,计算了 2~8 mm 的不同情况;FCI 的厚度通常为 5 mm,计算了 2~7 mm 的不同情况.表 1 给出了本文中所计算的材料属性.

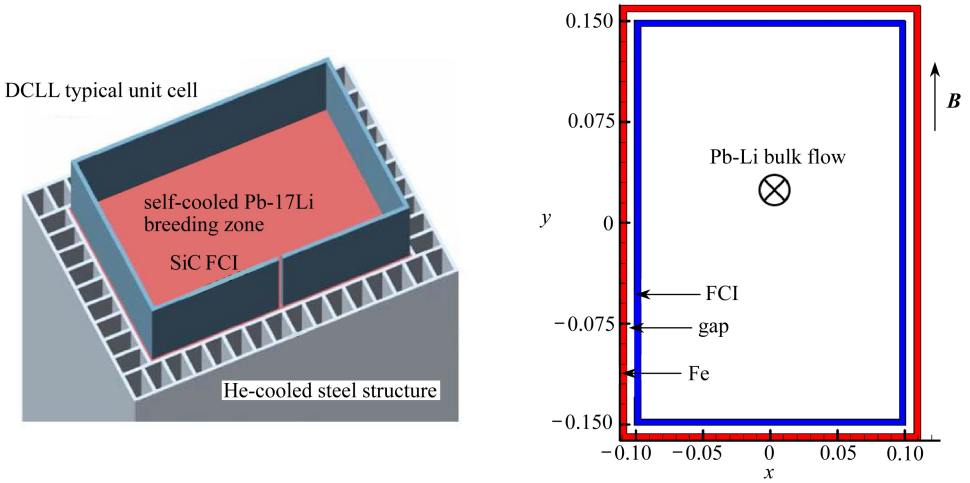


图 1 DCLL 流道结构示意图

Fig. 1 Geometry of the DCLL flow channel

表 1 材料属性

Table 1 The material parameters

material	property	value	units
PbLi	density ρ_1	9 500	kg/m ³
	dynamic viscosity μ	0.001 786	Pa·s
	thermal conductivity K_1	16	W/(m·K)
	specific heat capacity c_1	190	J/(kg·K)
	electric conductivity σ_1	8.5×10^5	S/m
SiC	density ρ_2	2 500	kg/m ³
	thermal conductivity K_2	8	W/(m·K)
	specific heat capacity c_2	1 200	J/(kg·K)
	electric conductivity σ_2	0~200	S/m
	elastic modulus E	2×10^{11}	Pa
Fe	Poisson's ratio ν	0.2	-
	thermal expansion coefficient α	3.3×10^{-6}	m·K ⁻¹
	thermal conductivity K_3	30	W/(m·K)
	specific heat capacity c_3	480	J/(kg·K)

在实际工况中, PbLi 流体将接受等离子体反应产生的中子辐照, 从而在主流区域产生持续的中子体积内热源. Abdou 等利用中子学计算了 PbLi 流体中的热源分布形式, 并拟合成指数形式的曲线^[15]. 中子热源的分布形式如式(1)所示, 其中 x 为径向坐标, 主流区中心处为 x 轴原点, a 为主流区域径向宽度, 当 FCI 厚 5 mm, 间隙流宽 2 mm 时, a 为 0.2 m, 将中子热源添加到流体部分的能量方程中进行了计算:

$$Q = 30 \times 10^6 \exp[-10(x + a/2)]. \quad (1)$$

1.2 控制方程

包层主流区和间隙流区内的锂铅流体在流动过程中受到外加磁场的作用, 满足磁流体动力学控制方程:

动量方程

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B}; \quad (2)$$

连续性方程

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (3)$$

Ohm(欧姆)定律

$$\mathbf{J} = \sigma_0(-\nabla \phi + \mathbf{u} \times \mathbf{B}); \quad (4)$$

电荷守恒

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \quad (5)$$

能量方程

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma_0} + Q; \quad (6)$$

其中, ρ 为物体密度, \mathbf{u} 为流体的速度矢量, p 为压强, η 为运动黏性系数, \mathbf{J} 为电流强度, \mathbf{B} 为磁感应强度, σ_0 为电导率, ϕ 为电势, C_p 为比热容, T 为流体或固体的温度, K 为流体或固体材料的热导率, Q 为中子热源。

对于固体域的计算, 由于 SiC 材料导电性较差, 同时在中子辐照下的热生成率较小, 因此进行传热计算时, 忽略式(6)中的速度项、电流项和中子热源项即可。

第一壁与外界氦气之间满足第 3 类边界条件, 其换热量为

$$q^* = h_f(T_s - T_f), \quad (7)$$

其中, h_f 为对流换热系数, T_s 为固体表面的温度, T_f 为周围流体的温度。对流换热系数取为 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 氦气温度为 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

对于 FCI 的应力和变形的求解, 需要满足弹性力学的基本方程, 即静力平衡方程

$$\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = 0 \quad (i, j = x, y, z); \quad (8)$$

几何方程

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}); \quad (9)$$

物理方程

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (10)$$

其中 σ_{ij} , ε_{ij} 和 u_i 分别为应力、应变张量和位移矢量, D_{ijkl} 为弹性张量, \bar{f}_i 表示合外力。

相比于普通流体力学方程组只需求解连续性方程、动量方程和能量方程, 磁流体力学方程组还要求解电势 Poisson 方程和电荷守恒方程等。同时, 在动量方程中增加了 Lorentz 力源项。为保证计算结果中的电荷守恒, 在磁流体力学的数值格式中引入我们之前发展并采用的相容守恒格式^[6-8], 计算电流密度所需要的电势梯度及速度与磁场的叉积是采用与电势 Poisson 方程相同的离散格式与插值方法完成的; 该格式计算的电流密度可以保证电荷守恒, 计算的电磁力可以保证动量守恒。

1.3 算法和模型验证

本文中的计算格式在以前的工作中已经进行了理论和试验上的验证, 并取得了较好的结果^[6-8]。这里简要地介绍一些验证工作, 磁流体部分对比经典的 Hunt 模型^[16], 即矩形截面流道中在横向均匀磁场作用下的充分发展层流模型, 其与包层中流动状态较为类似。验证算例中 Hartmann 数为 200, 由图 2(a) 中数值解与解析解的对比可以看出, 本文中的计算模型可以较

为精确地描述侧壁附近的速度梯度.同时,利用商业计算流体力学软件 Fluent 中的 MHD 模块进行求解,可以看出,Fluent 对这类问题的求解可以达到一定精度,但本文中所采用的算法和计算模型精度更高一些.

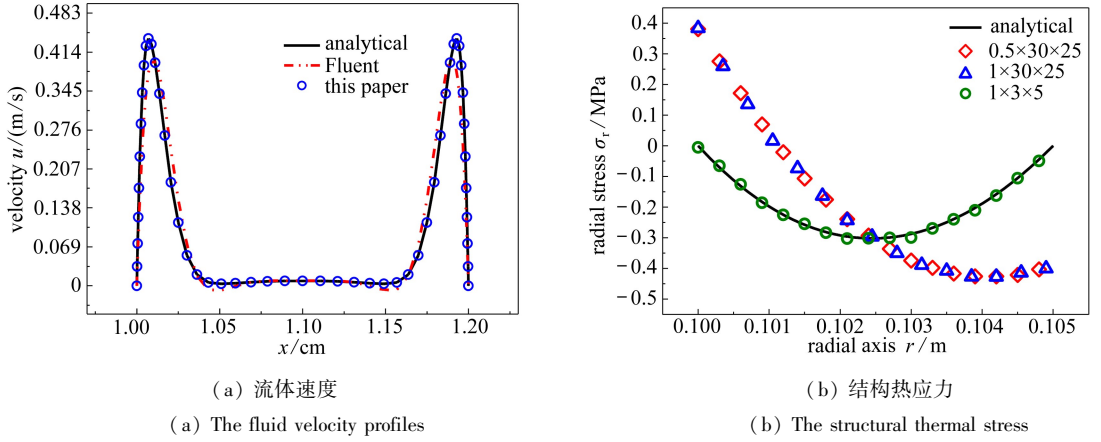


图2 数值解与解析解对比

Fig. 2 The analytical and numerical solutions in the Hunt flow case

对于结构应力部分,选取了厚壁圆筒内外壁存在温差时的热应力求解问题作为验证.图 2 (b) 给出了径向应力的解析解和本文数值解对比,计算中采用了不同的网格离散方式来验证网格无关性.可以看出,在采用较为合适的网格离散方法时,有限元法数值解可以达到较好的精度.

整体的计算思路如下:首先,采用有限体积法对磁流体部分速度场、压力场和电流场等进行求解,同时进行流体和结构的共轭传热求解,得到二者的温度场分布.然后,对于流固耦合界面,采用桶式搜索算法,进行流体和结构网格之间的匹配,在流体和固体的交界面上需满足:

$$T_S = T_F, p_S = p_F, \quad (11)$$

其中 T_S, T_F, p_S, p_F 分别为交界面处固体和流体的温度和压力,采用加权余量法进行数据映射.

对流道插件固体结构,采用有限元方法,计算结构在温度场和流体压力场共同作用下的位移、应变和应力.由于 SiC 材料的电导率较低,FCI 结构中的电流以及 Lorentz 力均较小,因此在计算过程中忽略电磁场的影响,主要考虑温度效应和压力效应对结构的作用.

2 计算结果分析

2.1 磁场效应影响

首先,考虑磁场效应对系统的影响.

以 FCI 厚 2 mm, gap 宽 8 mm 的结构为例,计算了 $B = 1 \text{ T}$ 时的情况,同时计算了无磁场的情况作为对比,图 3(a) 所示为出口附近截面速度分布.可以看出,磁场作用对流动特性产生了很大的影响.环向磁场作用下的 Lorentz 力抑制了主流区域中心部分的流动,而由于与磁场平行方向的边界层(侧层)附近的电流方向几乎平行于磁场,Lorentz 力较小,因此引起了侧壁附近的射流,在主流区域和间隙区域中均出现了图中所示的 M 型速度分布.当磁场强度增大时,这种效应将更加明显.而在无磁场作用时,在 2 m 长的流道末端,主流区域未形成充分发展流的抛物线型速度分布,而是出现类似梯形的分布形式,中心区域速度较为平缓,间隙区域流速也较为均匀.

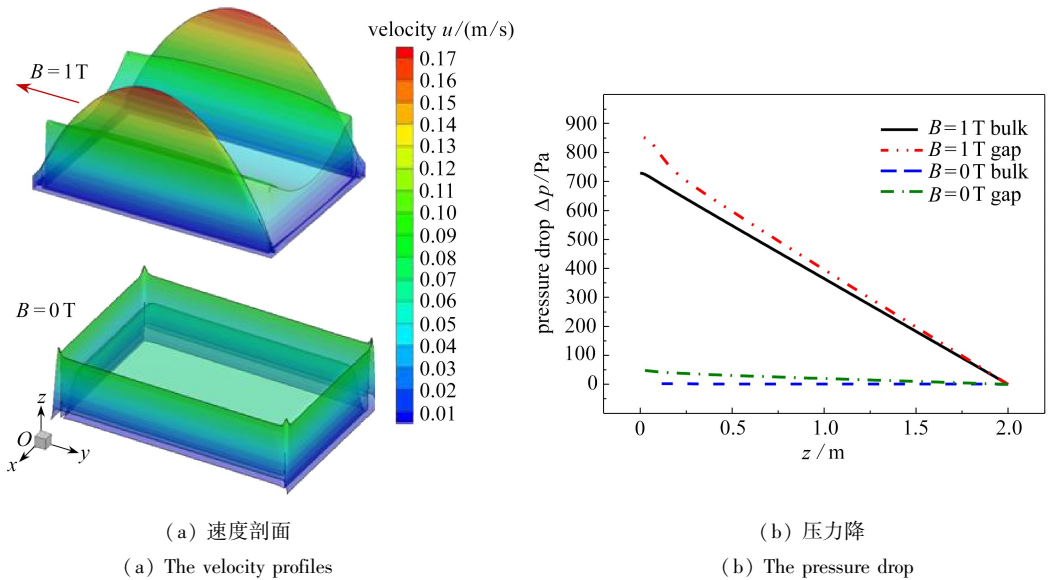


图3 有磁场与无磁场时速度和压力降对比

Fig. 3 The velocity profiles and pressure drop for $B = 1 \text{ T}$ and $B = 0 \text{ T}$

表2 磁场对包层内温度场、压力和应力场的影响

Table 2 Influences of the magnetic field on the temperature, pressure and stress fields

	$B = 0 \text{ T}$	$B = 1 \text{ T}$	increase
bulk flow $T_{\text{avg}} / ^\circ\text{C}$	655	688	+5%
bulk flow $\Delta p / \text{Pa}$	3	729	+245 times
gap flow $\Delta p / \text{Pa}$	50	1 463	+28 times
FW $T_{\text{max}} / ^\circ\text{C}$	526	460	-12%
FCI $\Delta T_{\text{max}} / ^\circ\text{C}$	75	153	+1 times
Mises stress $\sigma_{\text{max}} / \text{MPa}$	401	357	-11%

这种 MHD 效应引起的特殊流动特性,将影响到流体的传热形式,从而影响到 FCI 和第一壁结构的温度和热应力分布。在磁场的帮助下,主流区域和间隙流区域均在侧壁处出现了射流,这使得流体在该区域热输运效率增加,从而降低了 Fe 壁上的最高温度。

表 2 汇总了有磁场和无磁场作用下的温度、压力降、热应力等结果。在磁场作用下,主流区域的出口平均温度有所提高,这对提高 PbLi 流体的传热效率是有利的。压力降方面,由于 Lorentz 力的作用,有磁场作用时流体的压力降明显提高,这对流体的驱动是不利的。如图 3(b) 所示,磁场为 1 T 时和无磁场时,在 2 m 长的直线型流道中,进出口压力降相差约为 1 kPa,这与 Smolentsev 等^[17]的计算结果在数量级上一致,且间隙中的压力降比主流区更高。事实上,若不考虑 U 形弯道处的三维流动情况,仅在本文的长直流道中,压力和压力降引起的 FCI 一次应力很小,与热应力相差 3 个量级以上,因此,在结构分析中压力降成为次要因素。

2.2 结构特征影响

为探究不同结构特征对包层结构安全的影响,本文对 FCI 厚度分别取为 2 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 对应 gap 宽度分别为 2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm 等多种结构特征下的速度场、温度场、应力应变场和 FCI 变形等进行了计算。

由于钢壁结构中,通常面向等离子体反应中心的第一壁上温度最高,该壁面也最为危险,因此图 4 中以第一壁上的温度为研究对象,给出了 FCI 和 gap 不同结构特征时其内侧的温度分布。可以看出,FCI 厚度增大时,Fe 壁上的温度分布形式变化不大,但温度值有所降低,这是

因为 FCI 厚度增大会阻止主流区域的热量传递到 Fe 壁上,从而降低第一壁上的温度.而从图 4 (b)可以看出,当 gap 宽度增大时,Fe 壁上的温度不仅在数值上有所降低,而且在分布形式上出现变化,高温区域由近似的梯形分布变为较为明显的 M 型分布.这主要是由于随着 gap 的宽度增大,磁场作用下 gap 中的流量增大,MHD 效应引起的 gap 中的射流带走了更多 Fe 壁上的热量,使得 Fe 壁上随着流动方向逐渐出现了 M 型温度分布.在无磁场的计算条件下,则没有观察到 M 型温度分布.

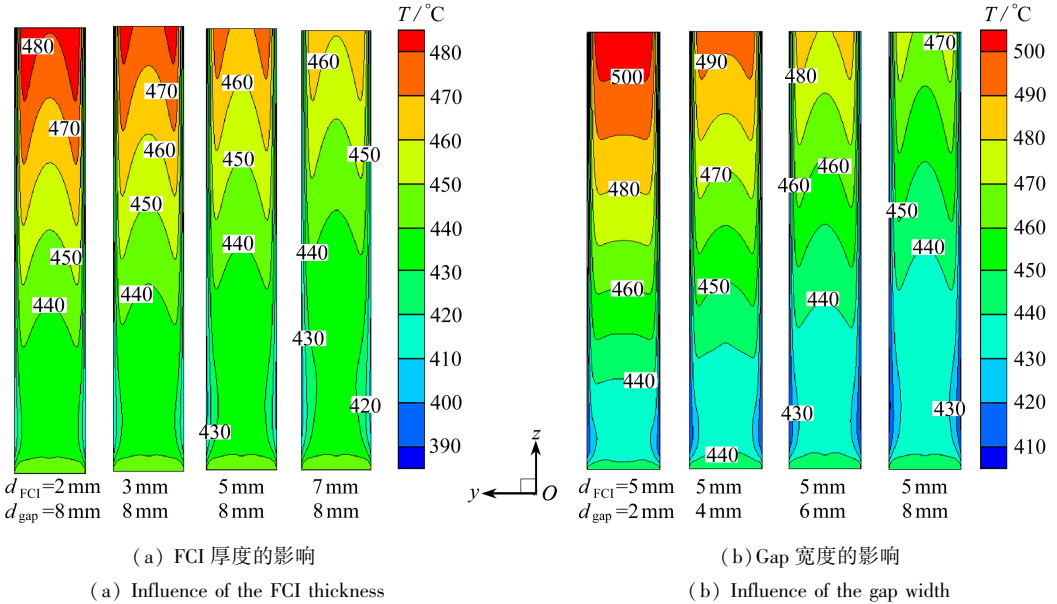


图 4 不同结构特征时 FW 内壁温度分布

Fig. 4 The temperature profiles of FW with various model parameters

FCI 内外壁的温差是结构安全的一个重要考量因素,一般情况下,应保证内外壁温差不超过 $200\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$.从图 5 中可以看出,当 FCI 厚度增加时,提高了隔热性能,其内外壁温差显著增大.而 gap 宽度增加时,FCI 内外壁温差稍有降低,并且分布形式上出现较大改变,这主要由 gap 中流动特性的改变引起.同时,FCI 的厚度对温差的影响较大.本文的计算中,当 FCI 为 7 mm ,且 gap 较窄时,内外壁最大温差已超过 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$,接近设计极限.因此,从降低 FCI 温度梯度的角度出发,FCI 厚度不应太大,同时可以适当增加间隙流宽度.

图 6(a)对 FCI 采用 16 种不同结构特征时,Fe 壁上出现的最高温度值进行了汇总,从图中可以看出,FCI 厚度和 gap 宽度对 Fe 壁温度的影响同样重要.FCI 厚度增大, gap 宽度增大都将使 Fe 壁上出现的最高温度近似于线性降低.在本文的计算中,两种最极端的情况下(FCI 厚 7 mm 、gap 宽 8 mm 和 FCI 厚 2 mm 、gap 宽 2 mm 两种情况),Fe 壁的最高温度相差约 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,这说明,采用较厚的 FCI 和较宽的 gap,对保证第一壁材料安全是有利的.而各国设计标准中,第一壁钢材的极限温度不尽相同,范围约为 $470\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$,本文计算得到的最高温度在一些情况下已接近或超出设计极限,因此,从第一壁的结构安全出发,选择较厚的 FCI 和较宽的 gap 更为合适.

图 6(b)对 FCI 采用 16 种不同结构特征时,FCI 中出现的最高 Mises 应力值进行了汇总.可以看出,FCI 厚度增加,间隙流宽度增加,均会引起 FCI 结构上出现的最大等效应力增加.值得注意的是,本文中计算的 FCI 热应力主要由两部分组成,一部分是由 FCI 内外壁温度梯度引起的,另一部分是由 FCI 上的温度与初始时刻参考温度(本文中取 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$)之间的温度差引起的.

因此,在增加间隙流宽度的情况下,虽然内外壁温差降低,但其变化幅度较小(图5中从约150℃减小到约140℃),而FCI上最高温度增加的幅度较大(从703℃增加到772℃),这种情况下,第二部分引起的热应力起主要作用,因此出现了温度梯度减小但热应力反而增大的情况。综合这些不同的结构特征,若选取Mises应力设计极限为400 MPa^[12],则图中16种结构有6种已超出设计极限。同时,对比第一壁上的最高温度,可以看出,FCI厚度和gap宽度对FCI上最大Mises应力的影响与对Fe壁上最高温度的影响完全相反,即增大FCI厚度和gap宽度对第一壁安全有利,而对FCI结构安全不利,两者成为了一对矛盾。因此,为了得到较为合适的设计方案,仍然需要对FCI结构进行详尽的优化设计与分析。

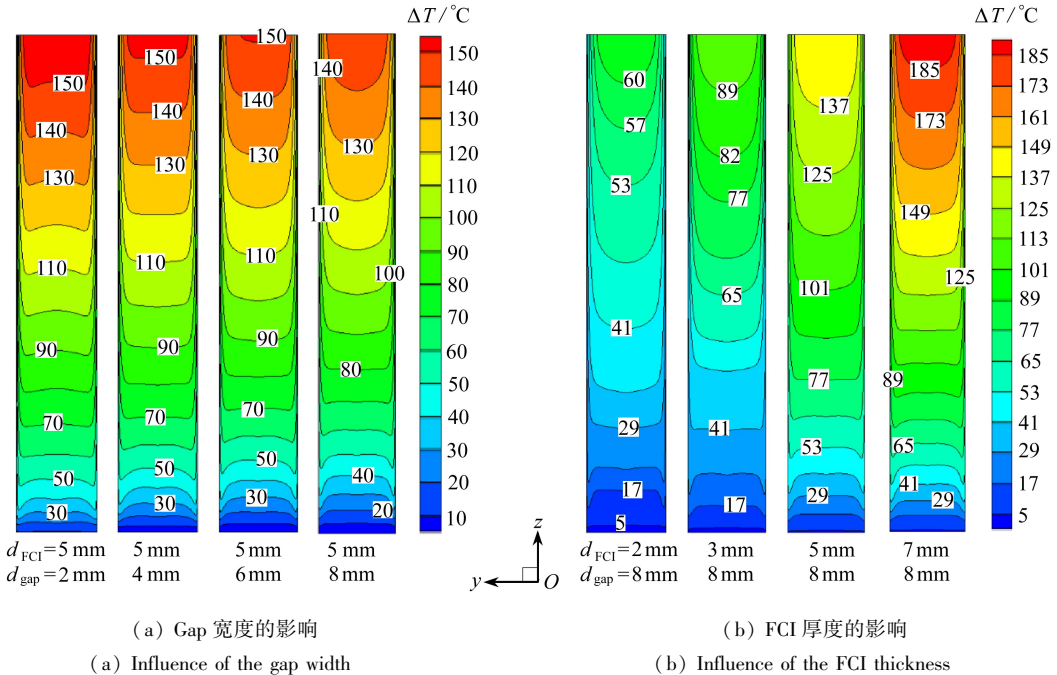


图5 不同结构特征时 FCI 内外壁温差分布

Fig. 5 The temperature difference distributions across the FCI thickness with various model parameters

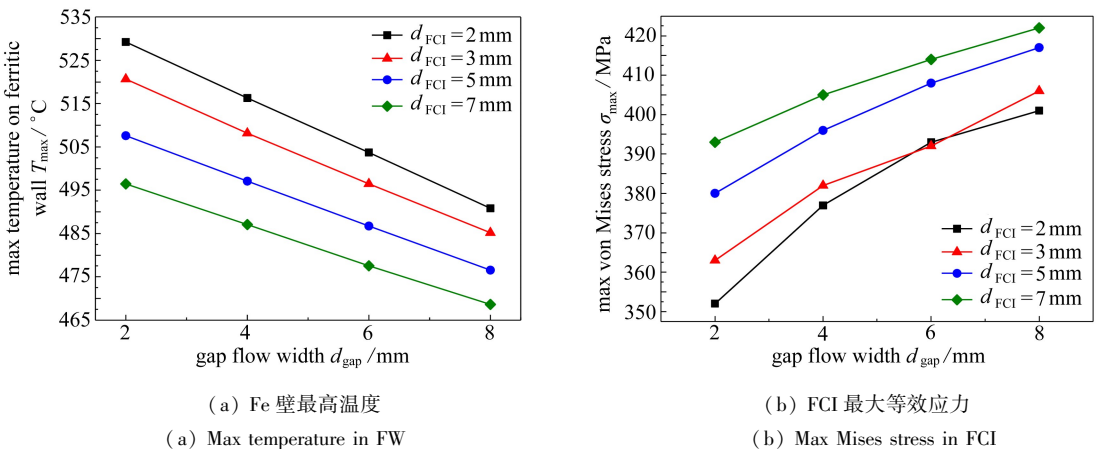


图6 不同结构特征时结果汇总

Fig. 6 The temperature and stress results across the FCI thickness with various model parameters

3 结 论

1) 在磁场作用下,流体产生 M 型速度分布,在侧壁附近形成射流。磁场效应有如下有利影响:降低第一壁温度;提高出口平均温度;减少 FCI 结构热应力。有如下不利影响:增加流体压力降;使流体驱动变得困难;增加 FCI 内外壁压力差;增加 FCI 一次应力。值得注意的是,在直道中 FCI 一次应力较小,几乎可以忽略。

2) 采用较厚的 FCI 时,其有利影响为:降低了第一壁上的最高温度,有利于保证第一壁材料安全。不利影响为:增加了 FCI 上的温度梯度和热应力。采用较宽的间隙时,有利于降低第一壁上的最高温度,但同时也增加了 FCI 上出现的最大 Mises 应力。因此,在包层结构的设计中,应综合考虑流动和结构安全问题,选择合适的结构特征。

参考文献(References):

- [1] Holtkamp N. An overview of the ITER project[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, **82** (5/14): 427-434.
- [2] Wong C P C, Abdou M, Dagher M, Katoh Y, Kurtz R J, Malang S, Marriott E P, Merrill B J, Messadek K, Morley N B, Sawan M E, Sharafat S, Smolentsev S, Sze D K, Willms S, Ying A, Youssef M Z. An overview of the US DCLL ITER-TBM program[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, **85**(7/9): 1129-1132.
- [3] Smolentsev V S, Moreau R, Bühler L, Mistrangelo C. MHD thermofluid issues of liquid-metal blankets: phenomena and advances[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, **85**(7/9): 1196-1205.
- [4] Smolentsev S, Cuevas S, Beltrán A. Induced electric current-based formulation in computations of low magnetic Reynolds number magnetohydrodynamic flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 2010, **229**(5): 1558-1572.
- [5] WANG Hong-yan, TANG Chan. Preliminary analysis of liquid LiPb MHD flow and pressure drop in DWT blanket of FDS-I[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, **87**(7/8): 1501-1505.
- [6] NI Ming-jiu, Munipalli R, Morley N B, Huang P, Abdou M A. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number—part I: on a rectangular collocated grid system[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, **227**(1): 174-204.
- [7] NI Ming-jiu, Munipalli R, Huang P, Morley N B, Abdou M A. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number—part II: on an arbitrary collocated mesh[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, **227**(1): 205-228.
- [8] NI Ming-jiu, LI Jun-feng. A consistent and conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number—part III: on a staggered mesh[J]. *Journal of Computational Physics*, 2012, **231**(2): 281-298.
- [9] Smolentsev S, Morley N B, Wong C, Abdou M. MHD and heat transfer considerations for the US DCLL blanket for DEMO and ITER TBM[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2008, **83** (10/12): 1788-1791.
- [10] Vitkovsky I V, Golovanov M M, Divavin V A, Kirillov I R, Lipko A V, Malkov A A, Kartashev I A, Komarov V M, Ogorodnikov A P, Schipakin O L. Neutronic, thermal-hydraulic and stress analysis of RF lithium cooled test blanket module for ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, **49/50**: 703-707.

- [11] Sharafat S, Aoyama A, Morley N, Smolentsev S, Katoh Y, Williams B, Ghoniem N. Development status of a SiC-foam based flow channel insert for a US-ITER DCLL TBM[J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, **56**(2): 883-891.
- [12] Sharafat S, Aoyama A, Ghoniem N, Williams B, Katoh Y. Heat testing of a prototypical SiC-foam-based flow channel insert[J]. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 2010, **38**(10): 2993-2998.
- [13] Ying A, Abdou M, Zhang H, Munipalli R, Ulrickson M, Sawan M, Merrill B. Progress on an integrated multi-physics simulation predictive capability for plasma chamber nuclear components[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, **85**(7/9): 1681-1688.
- [14] LIU Song-lin, JIN Qiang, WANG Wei-hua, LI Ming. Updated thermal-mechanical analysis of DFLL-TBM for ITER[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, **86**(9/11): 2347-2351.
- [15] Smolentsev S, Morley N B, Abdou M. Magneto-hydrodynamic and thermal issues of the SiC_t/SiC flow channel insert[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, **50**(1): 107-119.
- [16] Hunt J C R. Magneto-hydrodynamic flow in rectangular ducts[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1965, **21**(4): 577-590.
- [17] Smolentsev S, Wong C, Malang S, Dagher M, Abdou M. MHD considerations for the DCLL inboard blanket and access ducts[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2010, **85**(7): 1007-1011.
- [18] Aiello G, Giancarli L, Golfier H, Maire J F. Modeling of mechanical behavior and design criteria for SiC_t/SiC composite structures in fusion reactors[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2003, **65**(1): 77-88.
- [19] Riccardi B, Fenici P, Frias Rebelo A, Giancarli L, Le Marois G, Philippe E. Status of the European R&D activities on SiC_t/SiC composites for fusion reactors[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, **51/52**: 11-22.

Mechanical Behaviors of the FCI With Various Geometric Characteristics in Multi-Physics Fields

LI Ming-jian, CHEN Long, NI Ming-jiu, ZHANG Nian-mei

(School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, P.R.China)

Abstract: The flow channel insert (FCI) is an indispensable component in the ITER. It serves as the thermal and electric insulator in the blanket module. The mechanical behaviors of the FCI were investigated under the coupling effects of magneto-thermo-fluid-mechanical fields. Numerical investigations based on the finite volume method and finite element method were applied. The velocity profiles, temperature distributions and structural stress states were analyzed. Influences by the magnetic field and geometric characteristics of the FCI on the blanket module were investigated. Results show that, a stronger magnetic field causes lower first-wall (FW) temperature and FCI thermal stresses despite leading to the MHD effects, a thicker FCI yields lower FW temperature yet higher FCI temperature gradient and thermal stresses, and a wider gap leads to lower FW temperature yet higher Mises stresses in the FCI.

Key words: multi-physics field; blanket module; FCI; thermal stress; fluid-structure interaction

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China(51376175)