包层模块几何特征对MHD流动和流道插件力学行为的影响

李明健¹, 陈龙¹, 张哲妍², 倪明玖¹, 张年梅^{1*}

1. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100190;

2. 天津大学求是学部, 天津 300350

* E-mail: nmzhang@ucas.ac.cn

收稿日期: 2019-02-14; 接受日期: 2019-05-08; 网络版发表日期: 2019-06-27

国家重点研发计划(编号: 2017YFE0301300)和国家自然科学基金(批准号: 51776194和51376175)资助项目

摘要 在国际热核聚变反应堆中, 液态包层是能量转换的关键部件, 位于包层模块内的流道插件(FCI)的主要作用是绝缘和绝热, 流道插件的几何尺寸对包层内MHD流动特性、传热性能和结构安全性有很大影响. 本文应用相容守恒格式的有限体积法分析磁场作用下金属流体的流动行为和温度场特点, 并采用顺序耦合的方式, 用有限元方法分析流场和温度场对结构的应力应变产生的影响. 详细研究了流道插件厚度和间隙区宽度对MHD流动传热的作用, 并引入无量纲数定量分析包层的传热效率. 研究表明, 插件厚度和间隙区宽度非线性、非单调地影响着传热效率、MHD压降、第一壁温度和流道插件的热应力. 通过对大量计算数据的分析, 本文建立了MHD压降与间隙区宽度的关联式; 综合热效率、压降、第一壁温度和结构热应力作用, 推荐了包层结构设计. 本文为包层模块的优化设计提供了理论基础.

关键词 多物理耦合场, 包层模块, MHD, 传热, 热应力

1 引言

双冷液态锂铅包层(dual-coolant lead-lithium blanket)^[1]是国际热核聚变反应堆中的关键部件. 碳化硅复合材料(SiC_f/SiC)制成的流道插件(flow channel insert, FCI)^[2]在包层模块中承担着绝热和绝缘的双重任务, 绝热是为了减少从锂铅流体到氦的热损失, 绝缘是为了降低MHD压降^[3]. 从20世纪90年代起, 国内外学者针对包层性能进行了大量研究. Smolentsev等人^[4]研究

了MHD压降、锂铅流体的热损失以及包层模块内的温度分布, 结果表明, 在极端环境下, 结构的温度将超过容许范围; Sharafat等人^[5]利用开孔碳化硅泡沫材料设计了流道插件, 该插件能够承受聚变堆正常工作环境下的机械应力和温度应力. Sharafat等人^[6]对流道插件的足尺试件进行了内加热和部分浸没试验, 同时也数值模拟研究了结构的安全性问题. Ying等人^[7]应用多物理集成的计算平台研究包层的工作状态. 结构分析的结果表明包层中的最大应力大于材料的屈服极

引用格式: 李明健, 陈龙, 张哲妍, 等. 包层模块几何特征对MHD流动和流道插件力学行为的影响. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 1186–1196
Li M J, Chen L, Zhang Z Y, et al. Impacts of geometrical characteristics on MHD flow and mechanical behaviors of FCI in blanket modules (in Chinese). Sci Sin Tech, 2019, 49: 1186–1196, doi: 10.1360/SST-2019-0056

限. Liu等人^[8]应用有限元方法研究了中国DFLL-TBM在热环境、压力和电磁力作用下的工作性能, 结果显示在正常的工作环境中, 结构的机械应力与温度应力总和要低于屈服限, 结构是安全的.

聚变堆内的包层处于复杂的多物理场环境中, 物理场的相互作用影响着包层的性能, 只有充分了解多物理场的耦合效应, 才能为包层的设计和 optimization 提供可靠的理论依据. 文献^[4-6,8]虽然应用5 mm厚的流道插件和2 mm宽的间隙区对包层性能进行了研究, 但到目前, 插件厚度和间隙区宽度这些几何特征仍然是包层设计的主要内容, 它们对耦合系统有重大的影响, 特别是在强磁场环境下, 这个影响尤为突出. 我们对包层模块进行了大量的数值模拟, 结果显示, 包层的几何特征不仅影响流体的压力场, 而且影响流体的流动传热特性; 进而, 流体的流动和传热状态也影响着结构的应力状态. 本文中, 应用相容守恒格式的有限体积法求解了大Hartmann数的磁流体力学方程, 分析了金属流体的流动特征和传热特性, 应用有限元方法分析了结构的应力场和应变场, 探讨了包层几何特征对多物理场耦合效应的影响规律, 揭示了多物理场的相互作用机理, 给出了优化设计建议.

2 计算模型和计算方法

2.1 几何尺寸和材料物性

图1所示是双冷锂铅包层模块的几何构型. 锂铅流体在钢壁围成的矩形通道内沿 z 方向流动, 碳化硅复合材料制成的流道插件将该通道分离成间隙区和主流区. 图1中所示的 x , y , z 方向分别为聚变实验堆的径向、环向和极向.

为了研究包层几何特征对MHD流动、传热和结构热应力的效应, 本文中采用4种厚度2, 3, 5, 7 mm的流道插件和4种宽度2, 4, 6, 8 mm的间隙区共16种模型进行模拟, 16种模型的外壁尺寸保持不变. 矩形流道径向方向两外壁相距0.224 m, 环向两外壁相距0.324 m, 流道的极向长度为2 m, 钢壁的厚度是5 mm. 钢壁的周围有氦气进行对流换热.

温度为460℃的锂铅流体以速度0.06 m/s由流道下部进入, 向上流动. 作用在流道上的环向磁场强度高达1 T, 流体的雷诺数(Reynolds number, Re)达到68000, 哈特曼数(Hartmann number, Ha)接近2330. 尽管流体的

图1 (网络版彩图)包层模块的几何构型

Re 数较大, 但是磁场对金属流体的流动有较大的抑制作用, 所以模拟中仍采用层流模型^[3].

表1中列出了液态金属锂铅、碳化硅复合材料和钢壁材料的物性参数.

2.2 控制方程

在流体区, 磁场作用下的流体应满足以下磁流体力学方程.

动量方程:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B}; \quad (1)$$

连续性方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0; \quad (2)$$

欧姆定律:

$$\mathbf{J} = \sigma_0(-\nabla \phi + \mathbf{u} \times \mathbf{B}); \quad (3)$$

电荷守恒:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0; \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) + \frac{\mathbf{J}^2}{\sigma_0} + Q, \quad (5)$$

其中, ρ , $\mathbf{u}$, p , η 分别是流体的密度、速度、压力和黏度, $\mathbf{J}$, $\mathbf{B}$, σ_0 , ϕ 则分别是电流密度、磁场强度、导电率

表 1 材料参数

材料	物性	参数值
锂铅	密度	9500 kg/m ³
	动力学黏度	0.001786 Pa s
	热导率	16 W m ⁻¹ K ⁻¹
	比热	190 J kg ⁻¹ K ⁻¹
	电导率	8.5×10 ⁵ S/m
碳化硅复合材料	密度	2500 kg/m ³
	热导率	8 W m ⁻¹ K ⁻¹
	比热	1200 J kg ⁻¹ K ⁻¹
	电导率	0 S/m
	弹性模量	2×10 ¹¹ Pa
	泊松比	0.2
	热膨胀系数	3.3×10 ⁻⁶ m K ⁻¹
铁	热导率	30 W m ⁻¹ K ⁻¹
	比热	480 J kg ⁻¹ K ⁻¹

和电势, c_p , T , K 表示比热、温度和热导率. 聚变堆中, 来自于等离子体区的中子与锂铅流体作用产生体积热源, 包层模块主流区的热源用 Q 表示, 根据Smolentsev等人^[9]的中子学计算, Q 可以表达为

$$Q = 3 \times 10^7 e^{-10(x+a/2)}, \quad (6)$$

其中, a 是主流区的径向长度.

钢壁外的氦气与钢壁间满足对流换热边界条件:

$$q'' = h(T_s - T_f), \quad (7)$$

其中, h 表示对流换热系数, T_s 和 T_f 分别表示钢壁和氦气的温度. 在本文中, 设定氦气的温度 $T_f=400^\circ\text{C}$, 对流换热系数是 $h=4000 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

在固体区域, 流道插件和钢壁均满足热传导方程:

$$k \nabla^2 T = 0. \quad (8)$$

在流体-结构的交界面上, 应满足温度连续方程和压力连续方程:

$$T_s = T_f, p_s = p_f, \quad (9)$$

其中, 下角标s, f分别表示固体和流体区域, T 和 p 则分别表示温度和压力.

在固体区域, 应用力平衡方程(10)、小变形几何方程(11)和线弹性本构关系式(12)分析流道插件的应力和变形.

$$\sigma_{ij,j} + \bar{f}_i = 0, \quad (i, j = x, y, z), \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) + \alpha \Delta T \delta_{ij}, \quad (i, j = x, y, z), \quad (11)$$

$$\sigma_{ij} = D_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (12)$$

其中, σ_{ij} , ε_{ij} 和 u_i 分别是应力张量分量、应变张量分量和位移向量分量, D_{ijkl} , $\bar{f}_i$ 和 ΔT 分别表示流道插件材料的弹性常数、流道插件所受的体力 and 温差, α 则是流道插件材料的热膨胀系数, δ 是Kronecker数.

2.3 算法和验证

在模拟大 Ha 数的MHD流动中, 保证电荷守恒性是计算的难点之一. 本文以有限体积法为基础, 采用文献[10~12]提出的相容守恒格式模拟MHD在强磁场作用下的流动传热. 本文计算电流密度时采用与求解电势泊松方程相同的离散方式, 以保证电荷守恒. 首先, 应用散度公式计算单元中心处的洛伦兹力, 从数值上保证动量守恒; 然后, 将体心上的洛伦兹力插值到单元面上, 通过求解动量方程获得相应的速度. 在强磁场作用下, 侧层和哈特曼层内金属流体流动速度梯度很大, 模拟时需要在侧层和哈特曼层加密网格, 这导致了计算区域网格的强非均匀性, 此时采用以上的相容守恒格式就能够保证计算的精确性.

我们以前的工作^[12,13]已证明了相容守恒格式的精确性, 但对于本文所要研究的多物理场耦合问题, 我们仍对流体区和固体区的计算格式进行验证.

充分发展的Hunt流是MHD的典型算例, 文献[14]给出了其解析解, 本文以Hunt流验证本文的流体域计算模型. 图2(a)是 Ha 数为10000时的速度分布, 图中的点是相容守恒格式算法的计算值, 实线是解析解. 显然, 即使在边界附近速度梯度很大的区域, 数值解也与解析解吻合得很好. 而在高 Ha 数的情况, 商业软件Fluent的计算结果与解析解的偏差较大.

在固体区域本文采用有限元方法计算热应变和热应力. Timoshenko和Goodier^[15]解析地分析了圆管内外壁温差引起的热应力, 本文采用3种网格应用有限元软件ANSYS模拟此问题, 热应力计算结果绘制在图2(b)中. 数值计算解和解析解的对比表明, 采用 $0.5 \times 30 \times 25$ 的8节点二次单元可以得到收敛、准确的数值解. 该网格将用于本文固体区域的有限元计算.

图3给出了多场耦合的计算流程. 首先, 采用相容守恒格式的有限体积法交替求解流场和电磁场, 即以式(2)为限制条件求解流体动量方程(1), 得到流体速度

图2 (网络版彩图)计算模型的验证. (a) Hunt流的速度分布; (b) 温度梯度作用下圆管的热应力

图3 (网络版彩图)耦合计算流程

场; 然后联立式(3)和(4), 得到电势泊松方程, 采用电场求解器得到电势和电流, 再代回式(1)中, 用洛伦兹力更新下一时刻的流体速度场. 随后, 采用共轭传热求解器求解式(5), 其中计入了式(1)求得的流体速度影响、式(3)得到的电流造成的焦耳耗散以及式(6)产生的中子体积热源. 在温度场求解过程中, 固体部分不考虑焦耳耗散和中子热源, 即稳态形式下可将式(5)简化为式(8)描述其温度分布, 同时, 在流固耦合交界面上需要满足式(9)中的温度连续条件, 在固壁最外边界需要满足式(7)中的对流换热边界条件. 当得到最终充分发展后的流体速度、压力、温度场分布以后, 我们将其作为边界条件施加到固体区域, 并采用有限元进行应力、应变的求解. 在流固耦合交界面上, 需要满足式(9)中的力平衡条件, 我们采用面积投影加权的方式, 将流体区域计算的压力插值到固体的有限元网格上, 获得固体区域的面载荷, 该过程中可以保证总力的守

恒. 而温度场则采用最近距离插值方式, 将温度从有限体积网格的体心等效到有限元网格作为体力载荷, 再用虚功等效计算出温度载荷, 并最终求解出固体的位移、应力和应变场. 在固体求解过程中, 由于流道插件所用的碳化硅复合材料导电性差, 因此忽略插件中的洛伦兹力, 同时由于其中子作用下的热沉积也较铀铅低, 因此忽略其中的中子热源. 通过以上方式, 我们就可以得到包层结构最终的流场、温度场和结构应力应变场.

3 结果与讨论

3.1 MHD效应与压降

本节主要讨论包层模块几何特征对MHD效应和压降的影响, 计算了环向磁场强度为1 T、绝缘流道插件厚度为5 mm时, 4种间隙区宽度下速度场和温度场的变化形态, 如图4所示. 因为流道插件绝缘, 所以在流道插件内部金属流体的速度分布与Shercliff解相似; 而由于钢壁导电, 所以在间隙区出现了射流, 造成了速度场的M型分布.

当流道插件与钢壁间的间隙较窄时, 壁面的黏性力对速度场有较大作用, 金属流体流动在2 m内不能达到充分发展, 速度分布沿 y 方向为梯形; 当间隙区宽度增加后, 流动很快充分发展, 速度分布沿 y 方向呈现为抛物线型.

图4(b)表明, 当间隙区从2 mm逐渐变宽时, 间隙流的速度也逐渐增大; 但是, 继续加大间隙区宽度超过6 mm时, 峰值速度则随间隙区宽度增加而缓慢下降.

图4 (网络版彩图)不同间隙区宽度下流体速度. (a) 出口速度; (b) 出口端速度沿径向的分布($y=0$); (c) 不同间隙区宽度下流体的最大速度

因为流道插件是绝缘的, 插件内主流区流体的速度不会被间隙区宽度影响, 而且流体的进口流量保持不变, 所以主流区的流体速度在各种间隙区宽度下都几乎相同. 由于钢壁导电, 强洛伦兹力作用导致近钢壁处金属流体的速度很大; 间隙区流体的速度场受到黏性力和洛伦兹力的共同作用, 间隙区宽度较小时, 黏性力极强, 占主导地位, 所以流体的最大速度较小; 随着间隙区宽度略增加, 黏性力逐渐减弱, 流体的最大速度增

加. 而由于进口流体总量不变, 所以当间隙宽度进一步增大时, 间隙区流体速度下降. 图4(c)说明流体最大速度随着间隙宽度单调增加或减小而非单调变化.

计算结果表明, 流道插件的厚度几乎不影响流体速度分布.

所谓MHD压降是指进口和出口的平均压强差, MHD压降是包层研究中的重要因素之一. 图5表示了流道插件厚度和间隙宽度对主流区和间隙区压降的影响.

图5 (网络版彩图)各种模型中的压降. (a) 插件内核心区的压降; (b) 间隙区压降

如图5所示, 较厚的插件和较宽的间隙区都会导致主流区MHD压降增大, 而较宽间隙区导致压降减小, 但插件厚度不影响间隙区压降. 实际上, 相对于间隙区而言, 主流区的压降很小, 可以忽略. 因此, 为了降低压降、减少包层模块所需的泵功率, 建议采用较宽的间隙. 拟合图5(b)中的间隙区压降与间隙宽度的曲线, 可以发现二者满足以下关系式:

$$\Delta p \approx 982 + 6596e^{-x_{\text{gap}}}, \quad (13)$$

其中, Δp 是间隙区MHD压降, x_{gap} 是以毫米计的间隙宽度.

3.2 传热效率和结构内的温度场分布

为了提高热效率, 要求尽量提高流体的出口平均温度, 减少锂铅流体到氦气的热损失. 对于稳态流动的锂铅流体, 在包层模块中指数分布的中子热源产生的能量为

$$P_N = \iiint_{\Omega} 30 \times 10^6 e^{-10(x+a/2)} dV, \quad (14)$$

其中, Ω 表示包层模块内的主流区.

液态金属中产生的部分热能会传送到氦气中, 氦气对流换热的冷却功率为

$$P_{\text{He}} = \iint_A h_f(T_s - T_f) dS, \quad (15)$$

其中, A 是两个侧壁和哈特曼壁面积的总和.

包层模块内中子热源所生成的大部分热量都随锂铅流体带到出口端, 可由下式计算:

$$P_{\text{PbLi}} = \iint_{\text{out}} \rho c_p u_{\text{out}} T_{\text{out}} dS - \iint_{\text{in}} \rho c_p u_{\text{in}} T_{\text{in}} dS, \quad (16)$$

式中, ρ , u , c_p , T 分别表示锂铅流体的密度、速度、比

热容和温度, 下角标in和out分别表示流道的进口和出口, 进口端和出口端的面积分包括插件内的主流区和间隙区.

本文引入一个无量纲数 η 表示锂铅流体带走的热量与中子热源产生的热量比. η 越大表示锂铅流体带走的中子辐射热量越多, η 越小则表明被氦带走的热量越多.

$$\eta = \frac{P_{\text{PbLi}}}{P_N}. \quad (17)$$

计算结果表明, 16种模型的热量比 η 都大于80%, 如图6所示. 图6说明, 较厚的流道插件和较宽的间隙都会减少热量向氦气传送, 所以提高了传热效率 η .

包层模块设计的重要准则之一是钢壁温度, 按照容许腐蚀速度, 通常钢壁温度限制在480℃以下. 图7绘出了第一壁内壁面上的温度分布. 显而易见, 由于间隙宽度对间隙区的传热影响很大, 即使在同样的插件厚度下钢壁上的温度也有明显的差异. 对比图4(a)

图6 (网络版彩图)16个模型的出口传热效率

图7 (网络版彩图)第一壁内表面温度. (a) 不同的间隙宽度; (b) 不同的插件厚度

可见, 第一壁上的等温线与间隙流的速度云图非常相似, 这表明间隙区内的能量传递由流体流动主导. 当间隙区增宽, 其内流体的最大速度也增大, 致使第一壁上的最大温度降低. 值得注意的是, 当间隙宽度从6 mm增宽到8 mm时, 虽然流体的最大速度略微下降, 但是温度仍然稍有降低. 因为8 mm间隙区内流体流动更快, 这会使得第一壁附近的传热增强.

流道插件越厚, 导热性能越差. 图7(b)中绘制了4种插件厚度时第一壁上的温度分布. 流道插件厚度增

大时, 流体速度变化很小, 所以温度分布云图很相似. 但增加插件厚度, 可以减少插件内主流区的热量向间隙区传递, 所以第一壁上的温度降低.

包层设计中插件内外壁温差(ΔT_{FCI})通常限制在200 K内. 图8(a)显示了间隙宽度与 ΔT_{FCI} 的关系. 间隙宽度的变化会引起间隙区流体的流动速度分布和传热效应改变, 从而导致插件内外壁温差的改变. 如图8所示, 间隙增宽, 内外壁温差的最大值略有减小.

当流道插件增厚时, 插件内外壁温差的分布是相

图8 (网络版彩图)插件内外壁温差. (a) 不同的间隙宽度; (b) 不同插件厚度

似的, 但数值在逐渐增加, 如图8(b)所示. 这是因为, 插件增厚能够减少从插件内主流区向间隙区的传热, 同时也增加了壁厚方向的温度梯度. 从计算结果可见, 5 mm厚的插件和8 mm宽的间隙区宽度既能满足插件内外壁温差要求, 又能满足钢壁温度限制要求.

3.3 流道插件应力分析

对于碳化硅复合材料, 纤维的分布数目和排布方式在不同方向上有所差异. 一般来说, 在厚度方向上的力学性能较弱^[16]. 以下主要针对5 mm插件、8 mm间隙宽度的包层模块, 详细讨论流道插件的面内应力和沿厚度方向的法向应力. 表2中列出了各方向上应力的容许值和von-Mises应力的容许值.

图9中表示了流道插件内的von-Mises应力、面内应力和沿厚度方向的应力. 图9(b)给出了哈特曼壁上的径向应力和侧壁上的环向应力, 这两种面内应力都

低于所给容许应力. 图9(c)给出了面内的极向应力, 显然, 极向压应力是安全的, 而最大的拉应力发生在插件的棱边上. 沿厚度方向的法向应力场绘制在图9(d)中, 从应力云图可见, 虽然碳化硅复合材料在厚度方向的力学性能较弱, 但最大法向拉应力和压应力仍均低于容许值.

图10表示了不同几何特征包层模块中流道插件的 von-Mises应力. 图10(a)和(b)绘出了间隙宽度为 2 mm、不同插件厚度下侧壁和哈特曼壁出口处的应力, 图中的曲线表明, 因为厚的插件有较好的绝热性能, 所以厚插件的热应力也较高. 图10(c)和(d)绘出了插件厚度为5 mm、不同间隙宽度下插件出口处两壁上的应力, 图中的曲线说明, 间隙越宽, 侧壁和哈特曼壁的应力也越大.

图11总结了几何特征对第一壁温度、流道插件内外壁温差和热应力的影响. 从图中的曲线可以看到, 包层的模型难以满足所有温度和应力容许值的要求, 只有两种构型, 即7 mm流道插件与6 mm间隙区宽度和5 mm插件与8 mm间隙区宽度, 能够满足设计要求. 图11(a)说明, 增加插件厚度或增加间隙宽度都能降低第一壁温度; 图11(b)~(d)表明, 插件越厚, 会引起插件内外壁温差 ΔT_{FCI} 增大, 导致热应力和热变形增加.

通过以上的模拟结果分析可知, 较厚的插件和较

表 2 碳化硅复合材料的许用极限

设计极限	数值
面内拉应力(MPa)	145
面内压应力(MPa)	580
沿厚度方向的拉应力(MPa)	110
沿厚度方向的压应力(MPa)	420
von-Mises应力(MPa)	400

图 9 (网络版彩图)流道插件内各方向的应力. (a) von-Mises应力; (b) 面内拉应力; (c) 面内极向应力; (d) 沿厚度方向的法向应力

图 10 (网络版彩图)16种包层模块模型的应力. (a) 不同厚度插件的侧壁应力; (b) 不同厚度插件的哈特曼壁应力; (c) 不同间隙宽度的侧壁应力; (d) 不同间隙宽度的哈特曼壁应力

图 11 (网络版彩图)几何特征对结构安全性的影响. (a) 第一壁上的最大温度; (b) 流道插件壁厚方向的最大温差; (c) 流道插件内的最大等效应力; (d) 流道插件的最大环向位移

宽的间隙区对提高传热效率和保证第一壁的安全性都是有利的, 但对降低泵功率和插件的安全性却是无益的. 虽然, 5 mm插件的最大应力比3 mm插件的高出大约5%~6%, 但5 mm插件的刚度大大增高, 结构的稳定性也大大增加. 虽然3 mm插件与5 mm插件的包层模块的压力降很接近, 但5 mm插件的传热效率要比3 mm插件的高1.5%, 所以5 mm插件更适用. 从图11(a)还可看出, 若选用5 mm的流道插件, 则要采用较宽的间隙区, 以保证第一壁的安全. 图11(c)和(d)还表明, 当间隙足够宽时, 应力的增加速率越来越小, 最大环向位移的增加速度也减缓, 所以不宜选用过宽的间隙. 综合以上多种因素的考虑, 建议采用5 mm厚插件和6 mm宽间隙的构型, 在保证第一壁和流道插件安全的前提下, 获得最高的传热效率.

4 结论

本文以有限体积法和有限元方法为基础, 建立了模拟磁-热-流-结构多物理耦合场的计算平台, 并对16

种构型的包层模块中金属流体的流动、传热和结构安全性进行了数值模拟, 研究了包层结构几何特征变化对磁-热-流-结构多物理场耦合效应的影响, 主要获得了以下结论.

(1) 由于强磁场与结构几何特征的耦合效应, 间隙区宽度对间隙区金属流体速度场形式和速度值都有显著影响, 间隙宽度的单调增加会引起间隙区流体速度和压降的非单调、非线性变化.

(2) 间隙区越宽, 所需的泵功率越小; 但降低间隙区宽度有利于减小流道插件的变形和热应力.

(3) 较宽的间隙区和较厚的插件都会提高锂铅流体的出口热效率、降低第一壁温度、减少锂铅流体向氦的热传导.

(4) 总结了间隙区宽度与MHD压降的关联式, $\Delta p \approx 982 + 6596e^{-x_{gap}}$.

(5) 包层的几何构型非线性、非单调地影响着金属流体的流动特征和传热性能, 以及结构的力学性能. 综合传热性能和结构安全性能考虑, 最适合的包层构型是5 mm厚的插件和6 mm宽的间隙区.

参考文献

- 1 Tillack M, Malang S. High performance PbLi blanket. In: 17th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering. San Diego: IEEE, 1997. 1000–1004
- 2 Wong C P C, Abdou M, Dagher M, et al. An overview of the US DCLL ITER-TBM program. *Fusion Eng Des*, 2010, 85: 1129–1132
- 3 Smolentsev S, Moreau R, Bühler L, et al. MHD thermofluid issues of liquid-metal blankets: Phenomena and advances. *Fusion Eng Des*, 2010, 85: 1196–1205
- 4 Smolentsev S, Morley N B, Wong C, et al. MHD and heat transfer considerations for the US DCLL blanket for DEMO and ITER TBM. *Fusion Eng Des*, 2008, 83: 1788–1791
- 5 Sharafat S, Aoyama A, Morley N, et al. Development status of a SiC-foam based flow channel insert for a U.S.-ITER DCLL TBM. *Fusion Sci Tech*, 2009, 56: 883–891
- 6 Sharafat S, Aoyama A, Ghoniem N, et al. Heat testing of a prototypical SiC-foam-based flow channel insert. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2010, 38: 2993–2998
- 7 Ying A, Abdou M, Zhang H, et al. Progress on an integrated multi-physics simulation predictive capability for plasma chamber nuclear components. *Fusion Eng Des*, 2010, 85: 1681–1688
- 8 Liu S, Jin Q, Wang W, et al. Updated thermal-mechanical analysis of DCLL-TBM for ITER. *Fusion Eng Des*, 2011, 86: 2347–2351
- 9 Smolentsev S, Morley N B, Abdou M. Magnetohydrodynamic and thermal issues of the SiC/SiC flow channel insert. *Fusion Sci Tech*, 2006, 50: 107–119
- 10 Ni M J, Munipalli R, Morley N B, et al. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number. Part I: On a rectangular collocated grid system. *J Comput Phys*, 2007, 227: 174–204
- 11 Ni M J, Munipalli R, Huang P, et al. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number. Part II: On an arbitrary collocated mesh. *J Comput Phys*, 2007, 227: 205–228
- 12 Ni M J, Li J F. A consistent and conservative scheme for incompressible MHD flows at a low magnetic Reynolds number. Part III: On a staggered mesh. *J Comput Phys*, 2012, 231: 281–298

- 13 Xu S J, Zhang N M, Ni M J. Influence of flow channel insert with pressure equalization opening on MHD flows in a rectangular duct. *Fusion Eng Des*, 2013, 88: 271–275
- 14 Hunt J C R. Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. *J Fluid Mech*, 1965, 21: 577–590
- 15 Timoshenko S, Goodier J. *Theory of Elasticity*. New York: McGraw-Hill, 1951
- 16 Aiello G, Giancarli L, Golfier H, et al. Modeling of mechanical behavior and design criteria for SiC/SiC composite structures in fusion reactors. *Fusion Eng Des*, 2003, 65: 77–88

Impacts of geometrical characteristics on MHD flow and mechanical behaviors of FCI in blanket modules

LI MingJian¹, CHEN Long¹, ZHANG ZheYan², NI MingJiu¹ & ZHANG NianMei¹

¹ School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² Qiushi Honors College, Tianjin University, Tianjin 300350, China

Flow channel insert (FCI) serves as thermal and electrical insulator in the blanket module in the international thermonuclear experimental reactor (ITER). The geometrical characteristics of FCI greatly affect magneto-hydrodynamics (MHD) features, heat transfer and structural safety of the system. In this paper, the MHD flow and heat transfer in blanket modules with different FCI thicknesses and gap widths are investigated. Finite element method and finite volume method with a consistent and conservative scheme are used to deal with the magneto-thermo-fluid-mechanical fields. The detailed flow behaviors of metal fluid, thermal and mechanical behaviors in coupled field are investigated. A dimensionless parameter is introduced to evaluate the heat transfer efficiency. Results indicate the complicated effects of FCI thickness and gap width on heat transfer efficiency, pressure drop, first wall temperature and FCI thermal stress. The nonlinear and non-monotonous influences of geometrical characteristics on structural behavior and heat transfer efficiency are presented. The correlation between pressure drops and gap width is presented. After detailed analysis, a most promising design is recommended by evaluating heat transfer efficiency, fluid pressure drop, first wall temperature and structural stress. This work can be regarded as a foundation of future design and optimization of blanket modules.

multi-physics coupled fields, blanket module, MHD, heat transfer, thermal stress

doi: [10.1360/SST-2019-0056](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0056)