

准静态液态金属锂铅在 SLL 包层中的 流动换热

唐 婵 王红艳 裘浔隽

(南京工程学院能源与动力工程学院 南京 211167)

摘要 依据国际热核聚变实验堆(ITER)的中国单冷准静态液态锂铅实验包层模块(Single-coolant Lithium Lead, SLL), 研究液态金属工质锂铅在磁场作用下, 不同的第一壁热流密度对缓慢流动的液态锂铅流动和传热特性的影响, 为热工水力设计提供参考。研究表明, 液态金属处于准静态缓慢流动时, 第一壁热流密度的增加使得流道整体的温度有所提高, 特别是靠近第一壁的 L1 流道的温度增加幅度最大; L1 流道温度和速度变化剧烈, 产生变化较大的感应磁场和感应电流密度, 对应的洛伦兹力影响了流动换热。

关键词 液态金属, 流动换热, 磁流体动力学

中图分类号 TL64

液态金属 LiPb 的活性相对较低, 与空气、水蒸汽以及水的反应都比较弱, 是比较理想的氦增殖剂。LiPb 与结构材料 RAFM 和 SiC/SiC 等有较好的相容性, 氦在 LiPb 中的溶解度很低, 因此提取相对比较容易, 从目前技术来说, 具有很好的工程可行性, 已成为研究的热点。高压氦气单独冷却准静态液态锂铅实验包层模块(Single-coolant Lithium Lead, SLL)^[1-2]中, 液态锂铅只作为氦增殖剂, 不需要安装热与电绝缘流道插件, 且无需实现像自冷目的 LiPb 那样的快速流动, 因此液态金属 LiPb 在流道内可以缓慢流动以便于提氦。但是导电的液态金属在聚变强磁场环境下流动可能引起附加的磁流体动力学 MHD (Magnetohydrodynamics) 效应, 目前液态金属的流动和传热的影响是包层研究的关键问题。本文针对 SLL 模块内液态金属 LiPb 在磁场作用下, 由于液态金属流速较小, 而第一壁的热流密度相对较大, 研究主要用于提氦的缓慢流动的液态金属 LiPb 还有附带可能参与的换热, 考察热流密度的改变对准静态流动的液态工质流动换热的影响。

1 数学模型

对 MHD 流体的数值模拟, 关键是要求解流场和电磁场相互作用产生的感应电流, 以及液态金属内的感应电流与磁场相互作用产生的洛伦兹力对流动的影响。利用大型商用 CFD 软件 Fluent 模拟计算了液态 LiPb 磁流体在 SLL 全模型内的流动, 该软

件及子程序对模拟磁场情况及高哈德曼数下流动换热已有了很多验证及应用^[3-6]。

从流体动力学和电磁学方程出发, 根据流场和电磁场相互作用原理, 得到磁感应方程和感应电流密度方程, 使磁流体的控制方程离散为标准的输运方程。重点考察和分析了局部的流动特点、传热影响, 流动的质量和动量方程及磁感应、感应电流密度方程如下:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \right) \vec{V} = -\nabla p + \nabla (\mu \nabla \vec{V}) + \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{B} = \frac{1}{\mu \sigma} \nabla^2 \vec{B} + (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{V} \quad (3)$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{B} \quad (4)$$

式中, $\vec{B}$ 为感应磁场; $\vec{V}$ 为速度; $\vec{J}$ 为感应电流密度; p 为压力; μ 为流体的磁导率; σ 为流体的电导率。

根据 Fluent 定义的能量方程:

国家自然科学基金(10975073)、南京工程学院科研基金重点项目(QKJA2011002)、南京工程学院科研基金(QKJB201204)资助

第一作者: 唐婵, 女, 1982 年出生, 2007 年于南京航空航天大学工程热物理专业获硕士学位, 现从事核反应堆热工水力学和磁流体动力学研究
收稿日期: 2013-08-09, 修回日期: 2013-10-20

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{V}(\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k \nabla T - \sum h_i \vec{\Phi}_i + (\tau \cdot \vec{V})) + S_h \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{\vec{V}^2}{2}$, h 为各组分的总焓;

ρ 为密度; k 为导热系数; T 为温度; h_i 为各组分的焓; $\vec{\Phi}_i$ 为各组分的扩散通量。式(5)右边的前三项分别描述了热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运, S_h 为体积热源项。

2 计算模型

如图 1 所示, 液态 LiPb 从模块的上部由同心圆母管的环状外管流进, 然后经供给联箱的分流作用, 分别进入三个靠近第一壁(FW)的极向矩形管道(称 L1 流道)向下流动, 在模块的底部进行 180° 转弯改变方向, 同时分为二个支管(简称 L2 和 L3 流道)沿极向方向向上流动, 两个支管在模块的上部汇在一起经收集联箱, 从同心母管的内管流出^[1]。考虑实际模型在环向是对称的, 取在环向方向一边为对称边界。L1、L2 和 L3 的径向宽度 115 mm, 环向宽度 208 mm, 整个模型的极向长度是 1 738 mm。

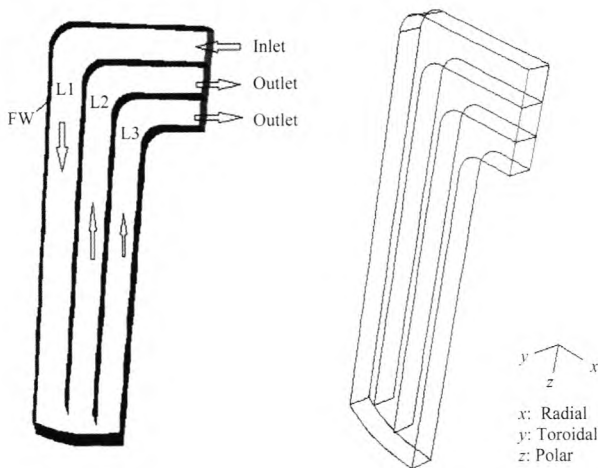


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Calculation model diagram.

对液态 LiPb 包层模块模型大部分网格采用贴体的六面体结构网格, 局部有弧度弯曲部分用混合体网格, 如图 2。经过网格实验验证确定网格总数为 60 万。假定管道壁是热导和电导的, 边界条件使用速度进口, 进口速度和温度分别为 0.003 m/s 和 450 °C, 出口使用压力出口。第一壁的热流密度分别取 0.3 MW/m²、0.4 MW/m² 和 0.5 MW/m², 磁场强度 2 T, 哈德曼数 Ha 和相互作用参数 N 分别为 4 970 和 11 170, 雷诺数为 2 210。

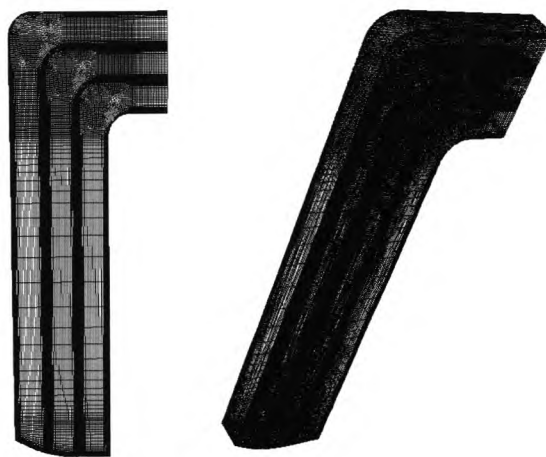


图 2 网格示意图

Fig.2 Grid schematic diagram.

3 结果分析

本设计中研究的模型主要使用氦气冷却液态锂铅包层, 准静态流动的 LiPb 主要用于提氦, 理论上不承担热负荷的冷却, 故流速很低。在流动过程中, 低流速的液态 LiPb 对流道的换热和边界层的分布必然造成影响, 进一步探讨主要用于提氦的 LiPb 在流道中在高的第一壁热流密度下还可能出现的对流换热影响。

研究讨论了包层模块内液态金属在准静态流动下, 第一壁热流密度 q 分别为 0.3 MW/m²、0.4 MW/m² 和 0.5 MW/m² 的情况下的对流换热的差异及影响。从温度场图 3 看出, 在三种热流密度情况下, 温度场整体分布差别不是很明显, 都是从 L1 流道向 L2、L3 流道温度逐渐降低, L1 流道的温度最高, 相比其他两个流道温度要高出幅度较大; 随着第一壁面热流密度的增加, 所有流道整体的温度都有所提高, 特别是 L1 流道的温度增加幅度最大。热流密度 q 由 0.3 MW/m² 增加到 0.4 MW/m² 和 0.5 MW/m² 时, 温度增幅特别明显。但热流密度从 0.4 MW/m² 增加到 0.5 MW/m² 时, 温度增幅不是太大, 局部温度出现偏差。与 $q=0.4$ MW/m² 相比, $q=0.5$ MW/m² 时 L1 流道较 L2、L3 流道温度提高幅度较大, L2、L3 流道内只是局部温度有所提高, L1 通道转角附近局部温度反而降低。

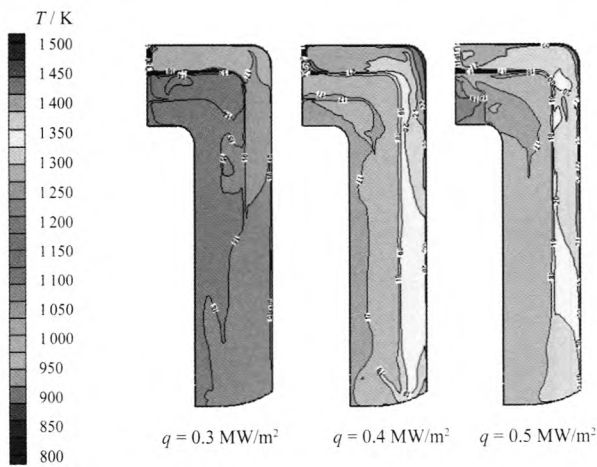


图3 不同第一壁热流密度下温度场分布图比较
Fig.3 Comparison of temperature field distributions in the first wall of different heat flux density (0.3 MW/m², 0.4 MW/m² and 0.5 MW/m²).

热流密度 q 由 0.4 MW/m² 增加到 0.5 MW/m²，流体的流动及温度边界层都会受到很大影响。如图 4 转角处速度场，壁面附近的流体速度相对增加，流体在转角处的流动边界层被破坏，贴近壁面出现逆流，形成较大的扰动漩涡，逆流的脱体带走的热量相比热流传导的热量要多，导致转角局部的温度反而有所降低。

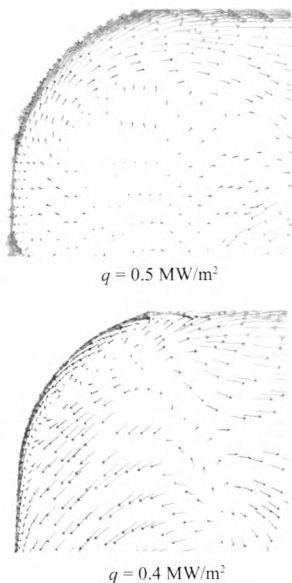


图4 热流密度为 0.5 MW/m² 和 0.4 MW/m² 转角处的速度场
Fig.4 Velocity field in the corner with the heat flux density to be 0.5 MW/m² and 0.4 MW/m², respectively.

图 5、6 分别是不同的第一壁热流密度下的感应磁场和感应电流密度分布图。在第一壁热流密度分别为 0.3 MW/m²、0.4 MW/m² 和 0.5 MW/m² 下产生的感应磁场和感应电流密度分布大体相似。相比 L2、L3 流道，L1 流道内温度较高，速度变化较剧烈，故流道内的磁场和电流变化区域明显。热流密度的增加，L1 流道的温度增幅较大，故贴近第一壁局部温度较大的地方产生感应磁场和感应电流密度相对较大。由图 5 和图 6 的对比分析看出，感应磁场较大的地方感应电流密度相对也较大。结合温度分布图 3，感应磁场和感应电流密度相对较大的通道对应的温度也较高。由于 L1 流道内的感应电流密度变化最剧烈，局部相对值也较大，其对应的温度也是最高的。因此温度和感应磁场及感应电流密度之间存在一定对应关系。当流体处于缓慢的准静态流动时，随着第一壁辐射的热流密度增加，L1 流道温度和速度变化剧烈，产生感应磁场和感应电流密度变化也较大，L2、L3 流道的感应磁场和感应电流密度相对较小。

烈，故流道内的磁场和电流变化区域明显。热流密度的增加，L1 流道的温度增幅较大，故贴近第一壁局部温度较大的地方产生感应磁场和感应电流密度相对较大。由图 5 和图 6 的对比分析看出，感应磁场较大的地方感应电流密度相对也较大。结合温度分布图 3，感应磁场和感应电流密度相对较大的通道对应的温度也较高。由于 L1 流道内的感应电流密度变化最剧烈，局部相对值也较大，其对应的温度也是最高的。因此温度和感应磁场及感应电流密度之间存在一定对应关系。当流体处于缓慢的准静态流动时，随着第一壁辐射的热流密度增加，L1 流道温度和速度变化剧烈，产生感应磁场和感应电流密度变化也较大，L2、L3 流道的感应磁场和感应电流密度相对较小。

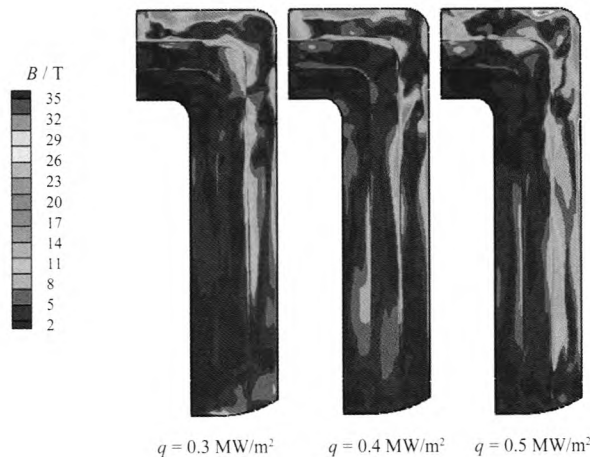


图5 不同第一壁热流密度下环向面产生的感应磁场比较
Fig.5 Comparison of inductive magnetic field on the toroidal surface of different heat flux density (0.3 MW/m², 0.4 MW/m² and 0.5 MW/m²).

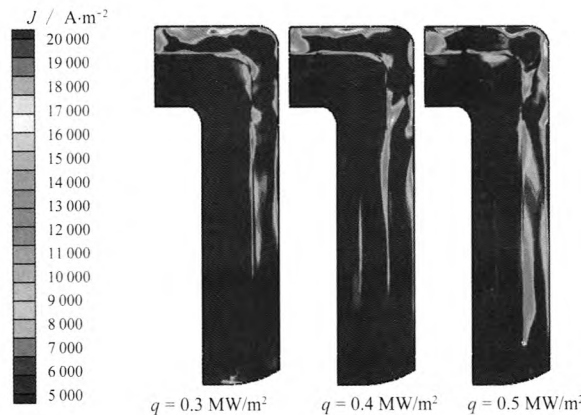


图6 不同第一壁热流密度下环向面产生的感应电流密度比较
Fig.6 Comparison of inductive current density field on the toroidal surface of different heat flux density (0.3 MW/m², 0.4 MW/m² and 0.5 MW/m²).

L1 流道受第一壁的高热流影响最大, 局部出现较高感应电流密度处对应的洛伦兹力也较大, 如图 7。图 7(a)是 L1 流道进口段出现局部高感应电流密度处的洛伦兹力的分布图, 图 7(b)为 L1 流道沿极向向下流动时出现局部高温处的洛伦兹力的分布图。环向面的边界层有偏离环向面的洛伦兹力, 与环向面搭接的流道外壁面附近的流体有指向外壁面的洛伦兹力, 使得环向面附近的流体偏离环向面流动; 部分流体挤向外壁面和环向面交接处, 增加了局部的热阻, 使得该处大量热量不能被带走, 从而产生了高温。如果洛伦兹力产生的附加力是偏离壁面方向的, 使得边界层被破坏或减薄, 则可能减小热阻, 增强换热; 如果洛伦兹力产生的附加力方向是指向壁面的, 那么流体的边界层增厚, 换热会削弱。故温度场中 L1 流道出现的局部高温由于流体的流速较低以及产生的洛伦兹力的附加作用, 使流体贴附壁面, 阻碍了的流体流动, 较高的热量不能及时带走, 从而温度较高。故洛伦兹力对边界层流体附加的方向不同, 直接影响壁面附近的流动换热。

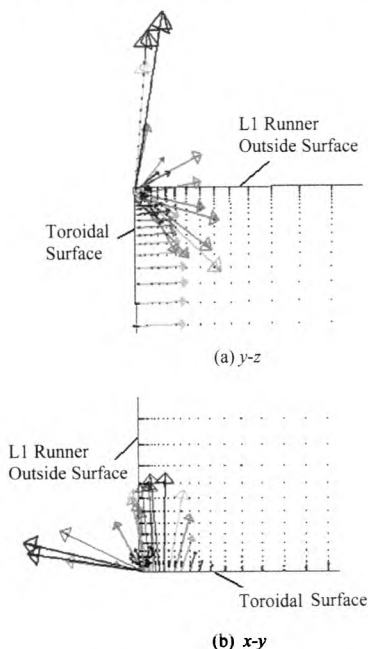


图 7 L1 流道局部洛伦兹力分布图
Fig.7 Local Loren magnetic profile in the L1 runner.

第一壁热流密度特别大时, 热量主要集中在 L1 流道。故工程设计时, 一方面可以改善 L1 流道设计, 采取适当的隔热和冷却措施; 一方面改变感应磁场及电流, 从而改变洛伦兹力的作用方向, 都会对流道的温度有较大影响。这些研究将在后续工作进一步展开。

4 结语

液态金属处于准静态缓慢流动时, 第一壁热流密度的增加使得流道整体的温度有所提高, 特别是 L1 流道的温度增加幅度最大。热流密度从 0.3 MW/m^2 增加到 0.4 MW/m^2 和 0.5 MW/m^2 时, 温度增幅比较明显。但热流密度从 0.4 MW/m^2 增加到 0.5 MW/m^2 时, 温度增幅不是太大。

第一壁热流密度的增加导致靠近第一壁的 L1 流道温度和速度变化剧烈, 产生变化较大的感应磁场和感应电流密度, 对应的洛伦兹力也影响了流动换热。

参考文献

- 1 王红艳, 吴宜灿. ITER 中国液态锂铅实验包层模块液态金属流动 MHD 效应数值模拟[J]. 核科学与工程, 2006, 26(2): 173-177
WANG Hongyan, WU Yican. ITER China lithium lead test blanket module MHD effects of liquid metal flow simulation[J]. Nuclear Science and Engineering, 2006, 26(2): 173-177
- 2 Wu Y, FDS Team. Conceptual design activities of FDS series fusion power plants in China[J]. Fusion Engineering and Design, 2006, 81: 2713-2718
- 3 Wu Y, FDS Team. Conceptual design of the China fusion power plant FDS-II[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83: 1683-1689
- 4 Wang H Y, Tang C. Numerical simulation and experiments of liquid metal LiPb flow in ducts with FCIS[C]. Xi'an: Proceedings of the 18th International Conference on Nuclear Engineering, 2010
- 5 Wang H Y, Tang C. Analysis of thermofluid and MHD pressure drop in liquid metal LiPb duct with flow channel inserts[C]. Porto, Portugal: The 26th Symposium on Fusion Technology, 2010
- 6 王红艳. 聚变堆包层液态金属流动 MHD 效应研究[D]. 合肥: 中国科学院研究生院, 2006
WANG Hongyan. MHD effects of liquid metal in Fusion reactor cladding[D]. Hefei: Chinese Academy of Sciences, 2006

Flow and heat transfer of quasi-static liquid metal Lithium-Lead in the SLL blanket

TANG Chan WANG Hongyan QIU Xunjun

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract Background: On the basis of liquid metal LiPb flow in the Single-coolant Lithium Lead-Test Blanket Module (SLL-TBM) system for ITER, the liquid metal flows slowly in a quasi-static way in the magnetic field. **Purpose:** The effects of liquid metal LiPb flow and heat transfer can provide references for the thermal analysis. **Methods:** The common software Fluent combined with compiled program was used in the computational simulation for various heat flux of the first wall. **Results:** The temperature of the whole flow passage increased with rise of the first wall heat flux density, especially that of L1 runner near the first wall. The temperature and velocity of the L1 runner changed prominently, producing larger change of the induction magnetic field and induction current density, and the corresponding Loren magnetic affected the flow and heat exchange. **Conclusion:** The induction magnetic field and induction current density have influence on the temperature distribution. These results can provide basis for the thermal-hydraulic design.

Key words Liquid metal, Flow and heat transfer, Magnetohydrodynamics (MHD)

CLC TL64