



磁约束核聚变反应堆研发相关的金属流体力学问题研究

倪明玖*

中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049

*联系人, E-mail: mjni@ucas.ac.cn

收稿日期: 2013-03-29; 接受日期: 2013-10-12

国家自然科学基金(批准号: 11125212, 50936006)和科技部 ITER 专项项目(编号: 2013GB114000)资助

摘要 简述了磁约束热核聚变反应堆的关键部件液态锂壁及液态锂铅包层研发中所涉及的流体力学及传热学研究背景, 重点介绍了强磁场作用下的金属流体流动与传热问题的实验与数值研究进展及需要进一步开展的研究问题.

关键词 磁约束受控热核聚变, 磁流体力学, 液态锂铅包层, 液态锂壁

PACS: 47.65.-d, 52.55.Fa, 44.35.+c

doi: 10.1360/132013-148

1 前言

磁流体力学(Magnetohydrodynamics, MHD)是流体力学的一个分支, 它的研究内容涉及磁场对导电流体的作用. 郭永怀先生早在 1950 年代就倡导电磁流体力学的研究^[1,2]. 人类对新能源的迫切需求推动了世界各个主要国家对热核聚变反应堆的研发. 受控核聚变提供一种潜在的、取之不尽的清洁能源, 是目前认为可以最终解决人类能源及环境问题的最重要的途径之一. 受控核聚变主要是利用氢的同位素氘和氚进行聚变反应产生氦和中子, 同时释放出大量的能量. 世界上主要发达国家和发展中国家都在积极开展受控核聚变能源的研究. 经过多年的发展, 磁约束受控聚变已经取得巨大的成就, 但是仍然面

临科学与技术方面的双重挑战. 国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)的研发是人类实现聚变能和平利用的重要步骤, 参加该项目的主要地区和国家有欧盟、美国、日本、中国、俄罗斯、韩国、印度等. 与此同时, 作为热核聚变的理论基础, 电磁流体力学也获得蓬勃的发展^[3,4]. 围绕磁约束聚变堆关键部件的液态锂第一壁及液态锂铅包层研发, 本文简要介绍其所涉及的液态金属磁流体力学效应^[5,6], 也就是强磁场作用下的金属流体流动、传热等基础热流科学问题.

2 聚变反应堆

能源短缺和环境污染是当今全世界共同面临的

引用格式: 倪明玖. 磁约束核聚变反应堆研发相关的金属流体力学问题研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1570–1578

Ni M J. Liquid metal hydrodynamics relevant to R&D of magnetoconfinement fusion reactor (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1570–1578, doi: 10.1360/132013-148

难题. 受控核聚变是能量巨大、原材料取之不尽、洁净、安全的新能源. 聚变须在足够高的温度下才能发生, 此时较轻的原子核聚合成较重的原子核而释放能量. 利用聚变发电则需要发展受控核聚变. 核聚变等离子体温度极高, 达到一亿度以上, 任何容器都无法承受如此高温, 通常采用惯性约束和磁约束将高温等离子体约束在一定区域. 人们熟知的托克马克装置就是最有前景的磁约束聚变反应堆.

受控热核聚变反应堆的发展有着很长的历史, 20 世纪 50 年代建立了最初的小型磁约束装置, 60–80 年代发展了托克马克装置, 90 年代则达到了聚变功率得失相当的水平. 21 世纪初, 世界协议建造国际热核聚变反应实验堆 ITER, 计划 2019 年第一次等离子体放电并开始系列实验. 在此基础上, 计划建立商业示范反应堆 (DEMO), 并在将来最终建立热核聚变反应堆. 我国在中国科学院等离子体研究所、核工业西南物理研究院也建设了磁约束热核聚变托克马克装置, 有西南物理研究院的中国环流器一号、二号^[7], 等离子体所的 HT-7、世界上首个全超导托克马克装置 EAST^[8]等. 2006 年中国正式签约加入 ITER 国际合作项目.

ITER 是磁性约束受控核聚变试验堆, 拟应用五特斯拉的强磁场把高温、高密度的等离子体团维持到一个空间, 使它不至于接触物体的器壁. ITER 采用氘和氚做燃料. 氘可以从海水中直接提取, 每升海水中含有 0.03 g 氘, 经聚变可提供相当于 300 L 汽油燃烧后释放的能量. 而中子和锂反应则产生氦, 自然界的锂和锂合金储量极为丰富, 足够人类长久使用. ITER 的建造将是人类推动聚变能利用的一个里程碑, 为聚变能的商业应用奠定基础.

受控热核聚变反应堆是一个极度复杂的高技术系统, 涉及高温到低温、高压到高真空、强电流与强磁场作用. 其等离子体反应区, 温度高达 10^9 K, 而超导磁体区温度则低至 4 K. 受控核聚变有两个关键反应, 氘氚等离子体反应产生中子并释放能量, 第一壁面对等离子体, 是聚变堆研发的关键部件之一; 中子和锂在包层内反应产生氦, 同时释放其携带的约 80% 的聚变能, 包层是聚变堆研发的另一关键部件. 围绕磁约束聚变堆关键部件之液态锂壁及液态锂铅包层的研发, 其核心科学问题之一是多物理场耦合下的液态金属磁流体力学效应^[9,10].

2.1 液态锂第一壁

在目前广泛关注的托克马克核聚变装置中, 将高温等离子体与真空室隔开的主要方法是采用限制器或偏滤器, 其功能还包括传递聚变产生的热量; 实现对杂质的有效控制; 在长脉冲运行条件下保持良好的第一壁状态, 稳定控制工作气体的再循环, 阻止非工作气体的进入; 维持良好的边界等离子体环境, 减少对第一壁材料的刻蚀. 边界等离子体和第一壁是一个相互耦合的系统. 它们之间的相互作用, 如氢滞留和边界再循环, 在很大程度上影响着等离子体的稳定运行, 而等离子体对材料的溅射刻蚀和熔化、蒸发则决定了第一壁材料和部件的寿命. 此外, 等离子体轰击第一壁产生的杂质, 一部分再沉积回到壁面并会引起第一壁材料的性质改变, 另一部分进入芯部, 造成等离子体的强烈辐射冷却, 重杂质如 W, Mo, 影响尤甚. 因此, 第一壁材料的选择对整个聚变装置而言是至关重要的.

根据其第一壁材料的形态, 偏滤器可分为固态和液态两种形式. 固态偏滤器的第一壁材料主要选用石墨、钨和铍材料. 石墨的物理溅射率高, 其严重的化学溅射产生的碳氢气体组分的远程再沉积将迅速导致装置内放射性氚滞留的超标, 而再沉积层中高的氢滞留导致高的边界粒子再循环、将会严重影响等离子体的稳定性; 铍材料的低熔点、潜在的有毒性、相对高的物理溅射率都限制了其应用; 钨是第一壁首先材料, 但由于其极高的辐射冷却特点, 与等离子体的相容性很差, 同时也存在熔化、蒸发、起毛起泡等热和粒子辐照问题.

近年来, 液态偏滤器概念, 特别是流动的液态锂偏滤器, 受到了国际上的广泛关注. 已有研究成果表明, 锂是控制粒子再循环的最有效手段, 不仅可以降低来自器壁的杂质, 还能有效地控制等离子体密度, 而流动锂的边界再循环几乎为零, 这对于稳态运行的核聚变装置具有重大意义, 可以解决大部分未来聚变堆所面临的难题, 包括长脉冲稳态运行、高能量约束等离子体、粒子控制和高密度放电、低的有效电荷数等. 通过使用锂限制器/偏滤器^[10–14], CDX-U 和 NSTX 得到的约束显著增强; NSTX 证明了锂对 ELM 的有效控制; EAST 实现了长脉冲 H 模放电. 流动的液态锂第一壁还可以满足高热负荷的输运能力, 可以承受高达 50 MW/m^2 的功率密度^[10,15]. 相对于固体

高热负荷材料, 流动液态金属自由表面具有无中子辐照损伤、无寿命限制、易于循环更新等优点. HT-7 则成功地开展了流动的液态锂壁实验研究^[16]. 因此, 具有自修复能力的流动液态锂壁概念, 将为磁约束聚变发展提供新的科学手段, 是一个非常具有应用前景的选择^[9,10,17].

2.2 液态锂铅包层

在产生聚变能的热核聚变堆中, 包层是实现高环境适应性和低发电成本的聚变能源利用的关键能量转换部件, 其主要功能包括氚增殖、能量转换和辐射屏蔽等. 高温氘氚等离子体受磁场约束在高温下反应产生中子并释放能量, 其中约 80% 的聚变能由中子携带, 中子穿过第一壁, 和包层里的锂铅反应产生氚并释放热量, 在包层内形成热源. 在热核聚变堆运行中, 氚将作为补充的反应材料, 和氘反应. 在 ITER 的氘氚反应试验中, 包层内由于中子反应产生的体积热流密度达 $\sim 10 \text{ MW/m}^3$, 且呈非均匀空间分布. 包层有水冷固态、氦冷固态和氦冷液态包层, 主要解决两个问题: 热核聚变反应堆的氚的自给和实现高效的能量转换. 中国实验包层的研发包括有固态^[18]和液态^[19], 其中固态有氦冷及水冷包层.

液态锂铅包层使用液态金属锂铅(LiPb)作为增殖材料, 其中 Pb 用于增殖中子, Li 用于增殖氚. 相比固态包层, 液态锂铅包层的优点体现于: 对托克马克复杂几何构型具有好的适应性, 具有高的氚增殖性; 液态金属增殖剂可作为氚的循环载体, 可以设计实时在线的氚提取系统, 减少包层的更换频率; 同时它还具有良好的导热和载热能力, 允许设计高功率密度、高热效率包层系统; 液态金属循环系统的存在可以实时在线补充消耗掉的 Li 同位素. 欧盟、美国和中国均将液态锂铅包层作为主要研究对象之一而重点发展, 如欧盟的氦冷锂铅包层(HC-LL)^[20]、美国的双冷锂铅包层(DCLL)^[21]、我国双功能锂铅实验包层(DFLL)^[19]模块等.

聚变反应堆经过多年的研发已经取得许多重要进展, 但是仍然存在许多的物理问题、材料问题及工程问题需要深入的研发. 液态锂铅包层、液态锂第一壁研发的核心科学问题之一便是多物理场耦合下金属流体的磁流体动力学效应.

3 磁流体力学效应

强磁场的作用会在流动的液态金属中产生很强的电磁力, 对液态金属自由表面不稳定性产生磁流体动力学(MHD)效应, 造成液态金属流动受阻、飞溅等问题, 至今研究人员仍没有找到一种有效控制 MHD 不稳定性的方法实现液态锂壁的安全有效运行. 包层内锂铅流体穿越磁场流动引起 MHD 效应^[21-23]带来的问题有: 电磁力引起的 MHD 压力降、影响流型流速分布以及改变流动特性、影响传热和结构材料的热应力分布、影响结构材料的腐蚀及氚向结构材料的渗透等. 热核聚变反应堆液态锂壁及液态锂铅包层主要部件内的金属流体处于强磁场作用下的复杂的多尺度三维流动与传热传质过程. 金属流体磁流体动力学的深入研究是液态锂壁安全有效运行及保证液态锂铅包层设计成功的关键所在, 为热核聚变领域当前非常重要与前沿的研究课题.

磁场作用下的金属流体流动是典型的不可压流动, 其控制方程可由不可压 Navier-Stokes 方程表述如下:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \sigma_s k \delta \nabla c + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \rho g (1 - \beta \Delta T), \quad (1)$$

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

其中 $\mathbf{u}$ 是速度, p 是压力, 动量方程中包含的源项分别是表面张力、电磁力及重力. 基于连续表面张力(CSF)模型, 通过引入 δ 函数, 可以将表面张力表示为体积力的形式, 其中 σ_s 为表面张力系数, k 为表面曲率, c 为表示自由界面的函数, 可以是 level set 函数^[24], 或者体积分数^[25]. 界面推进方程可以写为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} c) = 0. \quad (3)$$

$\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 是电磁力, 其中 $\mathbf{J}$ 为电流密度, $\mathbf{B}$ 为应用磁场. 通常电磁力的计算需要和 Maxwell 方程耦合求解, 但是实验室尺度下, 金属流体的磁雷诺数很小, 相比外加磁场, 诱导磁场可以忽略不计^[26,27]. 因此, 可以通过欧姆定律及电荷守恒定律求解电流密度, 进而计算电磁力.

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

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

这里 ϕ 为电势, σ 为导电系数. 磁流体动力学的两个

关键无量纲参数分别定义为: $Ha = LB_0 \sqrt{\sigma/\rho\nu}$ 为 Hartmann 数, $N = \sigma LB_0^2/\rho u_0$ 为相互作用参数, 分别表示电磁力和黏性力的比以及电磁力和惯性力的比. 而通常的 Reynolds 数可以表示为: $Re = Ha^2/N$, 代表惯性力和黏性力的比.

核聚变锂铅包层内的金属流体 Hartmann 数高达 $10^4 \sim 10^5$. 如图 1 所示, 与磁场方向垂直的壁面附近的边界层叫 Hartmann 层, 其无量纲厚度 δ_H 用 Ha^{-1} 度量^[28]. Blasius 边界层是被动型的, 只是适应主流区并满足固壁无滑移边界条件, 而 MHD 流的 Hartmann 层是主动型的, 边界层内电流密度是主流区电流密度的 Ha 倍, 并且决定主流区的涡量大小, 深入理解 Hartmann 层流动物理机理是 MHD 流的基础, 有效分辨 Hartmann 层也是精确模拟 MHD 的关键. 与磁场方向平行固壁叫侧壁, 相应的边界层叫侧层, 其无量纲厚度 δ_S 用 $Ha^{-1/2}$ 来度量^[29]. 金属流体在磁场作用下的流动与流道的几何形状、固壁的导电性及磁场的分布有着极大的关系. 在不同核心流区域存在 Ludford 层^[30], 当黏性力和电磁力起主导作用时 ($Ha \gg Re^2$), 无量纲厚度 δ_L 用 $Ha^{-1/2}$ 来度量, 当惯性力和电磁力起主导作用时 ($Re^{1/2} \ll Ha \ll Re^2$), δ_L 用 $N^{-1/3}$ 来度量. 在包层内的导电壁面、强的磁场梯度及管道形状的改变, 电磁力会在侧层内形成很强的射流, 而在主流区流速则很低, 形成磁流体动力学中典型的 M 型速度分布. 当射流足够强时, 可引起不稳定流, 甚至湍流. M 型速度分布对温度场有很大的影响. 而包层壁面的温度受到结构钢与 LiPb 相容性温度限制, 不能超过 480°C , 否则锂铅金属流体对壁面的腐蚀是不可容忍的^[19,21].

对于双冷或双功能液态锂铅包层 (DCLL 或 DFLL)^[19,21], 锂铅流体和中子反应产生的热量主要由锂铅流体本身冷却. 在其概念设计中, 为提高包层的热转换效率, 锂铅的出口温度很高, 可高达 700°C , 甚至 1000°C . 由于钢壁的最大温度限制, 为进行 DCLL

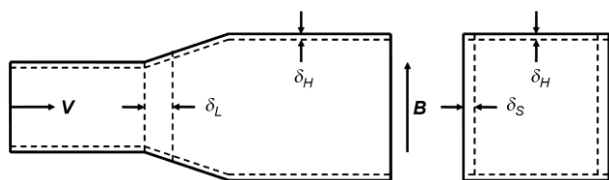


图 1 MHD 流边界层示意图

Figure 1 Sketch for MHD boundary layers.

或 DFLL 系统实验, 特别需要发展与热流相关的关键技术——流道插件 (Flow Channel Insert, FCI)^[19,21,31]. DCLL 包层钢壁里有氦气 (He) 冷却, 管道里流动的是锂铅金属流体, 在管道内放入由 SiC 材料制成的流道插件, 构成了电和热的绝缘部件. FCI 材料有低电率和低热导率以减小电磁力引起的压力降及降低钢壁的表面温度. FCI 和钢壁间的小缝隙流动的也是锂铅流体, 为了减小流道插件里外壁间的压差, 在 FCI 上开有小的通道或多个小孔. FCI 技术是 DCLL 和 DFLL 概念特需的技术, 直接关系到 MHD 效应的减弱. SiC 材料两侧温度差较大, 其热应力与材料的合成和结构形状有关, 热应力对 FCI 内的温度梯度有个限制, 关系到 FCI 技术的成败及 DCLL/DFLL 概念包层能否实现高效的能量转化. 围绕 FCI 技术的发展, 需要开展“流-固-热-磁”耦合的研究, 对其内部流动和传热做深入的研究和发展, 对探索新概念 FCI 设计具有重要的理论指导意义和实际价值. 最近开展的 FCI 内部三维流场的直接模拟发现其内部流动是全三维的^[32,33], 横截面上压力及压力梯度呈非均匀分布, 这对长期以来基于二维充分发展流假定开展的 FCI 研发提出了质疑. 西南物理研究院的 FCI 实验证实了流动的三维性, 美国 UCLA 也在开展这方面的实验研究^[34].

HCLL 为氦气冷却液态锂铅包层, 锂铅的流动速度很低, 只用于带走锂铅和中子反应产生的氚, 锂铅和中子产生的热量由钢壁内的氦气冷却. 由于钢壁的最大温度限制, HCLL 包层的锂铅出口温度较低, 其能量转化效率不高. 钢壁有涂层以减少氚的渗透 (传质问题), 同时降低 MHD 效应. 而涂层表面的微米量级微细尺度裂纹, 均可破坏涂层对降低 MHD 效应的影响^[35], 需要发展多尺度精确算法对其进行深入的研究.

在锂铅包层内中子和锂反应, 生成聚变反应所需的材料氚并产生巨大热量, 在包层内形成空间非均匀分布、强度高达 $\sim 10 \text{ MW/m}^3$ 的热源, 同时电磁场的影响还会产生 Joule 热耗散. 包层壁面低端和高端有温度差, 靠近等离子区的第一壁与远离等离子区的壁面有温差, 由温差引起的自然对流起着非常重要的作用. ITER 核聚变反应堆及示范堆 (DEMO) 包层内的金属流体流动, Grashof 数 Gr 在 $10^7 \sim 10^{12}$ 间, Hartmann 数 Ha 在 $10^4 \sim 10^5$ 间, 自然对流引起非定常流动和传热. 包层内金属流体的流动和传热现象极

其复杂, 涉及强磁场作用下的自然对流与强迫对流传热, 强磁场作用下的湍流流动与湍流传热, 同时氦往壁面的渗透及锂铅金属流体对壁面的腐蚀过程, 存在典型的传质问题, 这些基本现象与规律是流体力学与工程热物理学学科需要进一步深入研究的内容。

在聚变包层中, 同芯母管内金属流体在磁场作用下的再分配也是一种复杂的流动问题。锂铅通过小管道进入突扩管道, 经过一段流动分配到几个子管, 锂铅在各个小通道里流动, 并和中子反应产生热量和氦。同芯母管内的金属流体能否均匀地分配到各个子管中关系到包层结构设计的安全性和能量转换的效率。而金属流体在磁场作用下, 从小管道进入突扩管道或由扩展管道进入小管道, 会产生轴向电流, 在流体内部形成封闭圈, 流道插件不能对其产生有效的作用。对于突扩管道 MHD 流, 德国 FZK^[36]、美国 UCLA^[37]开展了详细的实验研究, FZK^[38], UCLA^[39]等开展了三维数值模拟, 验证了实验及模拟的正确性, 同时研究复杂通道内部 MHD 流的复杂机理。欧洲同行^[40,41]并进一步研究通道内部有障碍物的 MHD 流不稳定性, 国内也开展了这方面的数值研究^[42], 较好地揭示了 MHD 流的复杂性。

液态偏滤器采用液态锂回路带走等离子体部分热量和大部分杂质。液态锂偏滤器的研究处于方兴未艾的时期^[9-11]。通过多次锂化壁处理及锂的注入, EAST 装置获得 H 模等离子体^[14,15], 并成功实现 6.4 s H 模等离子体放电。液态流动锂壁, 随时补充新鲜的锂, 不仅可以降低粒子再循环, 还可以降低热负荷。锂化第一壁和液态流动锂偏滤器的研究是 EAST 未来几年研究的重点。

Seebeck 效应是 MHD 下一种特殊的热电效应。美国 UIUC 的 Ruzic 等基于 Seebeck 效应发展了新概念液态锂偏滤器^[43], 并建造了 SLIDE(Solid/Liquid Lithium Divertor Experiment)实验台, 对新概念液态锂偏滤器进行了可行性研究。常规的液态锂偏滤器锂循环由电磁泵驱动, 基于 Seebeck 热电效应下的液态偏滤器可实现在等离子体自身热流密度作用下的锂回路循环, 避免了采用电磁泵, 具有结构简单、经济, 更容易实现的优点。SLIDE 实验台的磁场强度仅有 800–1200 Gs, 而 ITER 聚变堆的磁场强度达 40000–50000 Gs。强磁场作用下, 液态锂偏滤器工作的可行性需要开展研究。美国普雷斯顿大学 PPPL 实验室 Zahkanov 博士^[44]和中国科学院等离子体研究所

在 HT-7 及 EAST 托克马克装置上开展了相关实验研究^[14], 在 HT-7 上成功地实现了液态锂膜流^[16], 研发液态锂壁仍需要开展锂浸润性、MHD 效应等的深入研究。

可以说, 液态锂铅包层涉及的关键科学问题之一为含大热源及磁流体力学效应下复杂几何构型内的流动、传热及传质问题。影响因素包括非均匀强磁场、大热源、氦渗透、几何构型、固壁导电性及固壁厚度等。液态锂偏滤器研发的核心问题是在聚变堆强磁场环境及等离子体作用下如何形成大面积稳态均匀锂流, 需要深入开展金属流体自由表面流的 MHD 效应的研究。影响因素则有: 等离子体-界面相互耦合, 特别是等离子体电流的影响; 磁流体力学效应; Maragoni 效应; Seebeck 效应; 极大热流密度等。面对等离子体固态第一壁的热流密度在等离子体不稳定下会剧增到 10^4 MW/m^2 , 第一壁材料会发生融化、凝固等现象, 其中涉及的主要热流科学问题有磁流体力学效应下的相变问题。

4 磁流体力学研究进展

磁流体力学效应是先进的液态包层及液态偏滤器的核心科学问题之一, 涉及多场耦合、大热源、相变传热、强磁场等, 其主要控制方程为 Navier-Stokes 方程及 Maxwell 方程。主要研究手段有理论分析、实验研究及数值分析。

理论分析主要分析简单的流动, 有助于深入理解 MHD 物理机理, 同时提供数值解的基准解。人们已经得到忽略惯性项的作用下两无限大平板 MHD 流、绝缘固壁槽道内的二维 MHD 充分发展流动^[28-30]、Hartmann 壁导电侧壁绝缘内及侧壁导电 Hartmann 壁完全导电的两维充分发展 MHD 流动的解析解, 对深入理解 MHD 物理机理及固壁对 MHD 流的影响机理具有重要的价值, 包括 Hartmann 层、侧层、Ludford 层的分析、壁厚以及非对称壁^[45]的影响等。

对于高 Hartmann 数和大的交互参数 N 下的 MHD 流, 可通过渐近分析法进行分析^[46,47]。结合理论分析和数值计算的渐近分析法, 侧重研究流动的主要特征。渐近分析法将流动分成两个区域: 在主流区, 电磁力和压力梯度平衡; 在薄的黏性区, 电磁力和黏性力平衡。这样, 复杂的三维问题就简化成几个二维的与压力梯度和电势相关的方程组。该方法快

速有效, 但同样忽略了惯性项的作用, 且局限于简单的几何形状.

实验研究主要对低或中等强度的应用磁场作用下的流场进行测量, Hartmann 数大多是在 1000–5000 这样的范围. 德国 FZK 的突扩管实验^[36], 揭示了 MHD 流的三维效应, 轴向电流会产生 M 型速度分布及 MHD 引起的压力降, 对传热传质有着很大的影响. 美国 Argonne 国家实验室对直管和圆管里的流体在变梯度磁场下的流动开展了实验研究^[48], 其结果已经成为三维数值模拟程序的基准比较之一. 核工业西南物理研究院对包层的流道插件内的 MHD 流动进行实验研究, 获得了 FCI 内的流速与压力分布^[49]. 中国科学院合肥物质科学研究院建立了系列锂铅回路, 研究锂铅流体在不同温度下对材料腐蚀的影响^[50].

包层内的锂铅流体速度分布对温度场及材料的腐蚀均有很大的影响. 锂铅金属流体的透光性不好, 无法采用激光多普勒测试仪或 PIV 等对速度进行精确地测量. 测量这类流体流速分布的主要方法有接触法和非接触法两类. 电势探针法用于磁流体动力学的试验中, 它具有结构简单, 传感器尺寸小的特点, 当采用非接触法测试时, 可以减少对流场的影响, 已经用于磁场作用下湍流特性的研究. 德国 FZK 突扩管道内的流速分布及 UCLA 则同芯母管内的流速分布均采用非接触电势探针法测量. 电势探针法中, 流体的流动方向要与磁场的方向垂直才能使用这种探针, 局限于充分发展区内流速的测量. 超声波多普勒测速法^[51,52](Ultrasound Doppler Velocimetry, UDV)利用脉冲超声波回波技术, 通过检测流体中分散的微小颗粒反射的回波相位的变化, 来测量流体的速度, 可以测量金属流体在磁场作用下的三维流速分布. 利用超声波多普勒测速仪已经成功地测量了低温液态金属汞的流场、镓的流场和高温金属钠的流场. 德国 HZDR 采用 UDV 方法测量了气泡驱动液态金属流体流动^[53].

现有的实验结果和理论分析成果对理解 MHD 机理提供了极为重要的理论依据, 也为 MHD 数值模拟提供了一个很好的验证手段. 磁流体力学的实验研究设备昂贵, 研究周期长; 理论分析通常忽略惯性作用, 仅限于简单几何外形和有限的参数范围, 而锂铅包层内 Re 高度 10^5 , Ha 高达 10^4 , 而 N 只有 10^3 , 无法忽略惯性项的影响. 随着计算机及计算流体动力学的发展, 数值模拟在磁约束核聚变液态包层及液态

锂壁的流动与传热传质的分析和研究中发挥着重要的作用. 金属流体的流动、传热及传质, 受到强磁场的影响, 在电磁力的作用下, 其流动特征和温度分布与无磁场作用下的一般流场和温度场有很大的差别, 使数值分析工作出现一些特殊的困难, 形成了对计算流体力学新的挑战.

基于 Maxwell 方程, 可以获得液态金属磁流体力学的诱导磁场方程:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{B} = (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu \sigma} (\nabla \mathbf{B} - (\nabla \mathbf{B})^T) \right). \quad (6)$$

该方程的求解有几个困难需要解决: 如何确保诱导磁场满足零散度约束条件以及如何提出物理精确的诱导磁场边界条件. 文献[54]详细讨论了零散度磁场约束条件的数值方法, 可以通过特殊的网格安排, 或者采用投影方法等通过在方程(6)引入标量梯度等来保证散度场为零等. 但物理上精确边界条件的提出仍然是个未完全解决的难题, 同时方程的求解效率也有待提高.

实验室条件下, 金属流体的磁雷诺数很小, 可以忽略诱导磁场的影响, 因而可以基于欧姆定律(4)及电荷守恒定律(5)获得电势泊松方程:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = \nabla \cdot (\sigma \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (7)$$

通过求解泊松方程获得电势, 通过欧姆定律求得电流密度, 进而计算电磁力, 通过求解 Navier-Stokes 方程获得速度及压力的分布. 在均分网格上, 对金属流体在磁场作用下的流动进行直接模拟, 由于需要分辨薄的 Hartmann 层以精确计算层内电流密度, 极大地增加了网格的数量, 三维问题 Ha 通常在 500 以下, 制约了在强磁场下 MHD 流的研究. 数值模拟 Ha 高达 10^4 – 10^5 的核聚变包层内的金属磁流体流动及传热, 需要非均分网格来提高计算效率. 非结构网格下的相容守恒格式的发展促进了 MHD 三维直接模拟^[55,56]. 该方法保证计算的电流密度精确满足电荷守恒定律:

$$(\nabla \cdot \mathbf{J})_c = \frac{1}{\Omega_c} \sum_{f=1}^{nf} (J_n)_f s_f = 0. \quad (8)$$

其中 J_n 代表网格面上的电流密度通量, 是基于欧姆定律(4)求得, 在计算中电势梯度的离散以及速度与磁场的插值均采用与离散电势 Poisson 方程相同的算法, 这样的相容格式确保了电流密度的计算满足零散度约束条件.

相容守恒格式同时确保计算的电磁力精确满足动量守恒:

$$\begin{aligned} (\mathbf{J} \times \mathbf{B})_c &= (\nabla \cdot (\mathbf{J} \mathbf{r} \times \mathbf{B}))_c - \mathbf{r}_c \times (\nabla \cdot (\mathbf{J} \mathbf{B}))_c \\ &= \frac{1}{\Omega_c} \sum_{f=1}^{nf} (J_n)_f (\mathbf{r}_f - \mathbf{r}_c) \times \mathbf{B}_f s_f. \end{aligned} \quad (9)$$

$\mathbf{r}$ 为引入的距离矢量, 下标 f, c 分别代表网格面及网格中心, Ω 及 s 则表示控制体体积及控制面面积. 采用相容守恒格式, 实现了 Ha 高达 10^4 下 MHD 流的精确计算. 三维非结构网格下的并行计算软件平台 HIMAG, OpenFOAM, CDP, CFX 等已可以精确模拟磁流体力学效应^[57-60], 被用来研究和分析与热核聚变包层设计相关的 MHD 流动, 成为美国、欧盟及中国磁约束热核聚变反应堆液态锂铅包层热流分析与研究的重要工具. 基于相容守恒格式, 在自适应网格下, 采用 VOF 方法及力平衡算法^[61,62], 实现了自由界面 MHD 流的精确计算^[63], 同时考虑了 Marangoni 效应、Seebeck 效应的影响.

MHD 不稳定性及湍流研究是目前电磁流体力学的一个非常活跃的研究领域^[59], 线性稳定性分析、非线性稳定性分析及直接数值模拟深化了 MHD 物理机理的研究, 也推动了磁约束聚变反应堆液态包层的研发. 液态金属自由界面 MHD 的研究, 虽然存在某些理论解, 但是自由界面 Hartmann 层的主动作用的研究也是最近几年才引起重视. 其深入研究需要发展测试手段, 对 MHD 膜流、射流、气泡驱动流开展实验研究; 需要发展精确的数值方法, 对其开展三维直接模拟, 包括精确的界面捕捉方法、精确的包括 Marangoni 效应下的表面张力计算、多流体及流固耦合下的电磁力的精确计算等. 德国 HZDR^[64,65]、中国科学院大学²⁾采用超声波测速仪测量 Ar 泡驱动的 GaInSn 流, 给出了气泡的速度分布, 并实验给出了气泡在水平磁场作用下速度随磁场强度的指数分布规律²⁾. 中国科学院大学³⁾同时数值研究了气泡的

运动轨迹、速度分布及尾涡结构分布, 深入研究了竖直磁场及水平磁场对气泡运动的影响. 由于氧化物的产生及气泡驱动金属流体流动的复杂性, 数值和实验结果存在明显的差异^[64]. 西南物理研究院及中国科学院大学的 GaInSn 回路、中国科学院大学的 MHD 自由表面流数值平台为进一步开展强磁场环境下液态锂壁研发所涉及的液态金属自由界面流打下了基础. 四川大学基于等离子体发生器建立的锂回路为开展液态锂与等离子体在磁场作用下的物理问题基础研究、等离子体研究所 HT-7 锂回路及 EAST 锂回路为开展托克马克环境下流动的液态锂壁研究等打下基础.

5 总结

作为热核聚变的理论基础, 电磁流体力学获得了蓬勃的发展, 在理论、实验和数值模拟方面均取得了长足的进步, 为人类和平利用聚变能作出贡献. 未来十至二十年, ITER 的建成、混合堆的研发及示范堆的可能建设, 聚变能正朝着商用化的目标大踏步前进. 围绕热核聚变堆能量转换关键部件液态锂铅包层及液态锂偏滤器的研发, 其核心科学问题磁流体力学效应下的传热传质问题的研究对推动聚变堆的发展至关重要, 未来十年主要研究方向是: 液态金属 MHD 高精度测试手段、高效精确算法及可靠预测能力的发展; MHD 效应下锂与中子反应的传热传质及等离子体与液态金属相互作用研究; MHD 多相流、MHD 稳定性及 MHD 湍流的物理机理研究及控制方法与技术发展; 磁约束聚变堆关键部件液态锂铅包层及液态锂壁的集成研发. 磁流体力学是物理、力学、工程技术科学等多学科高度交叉、紧密交织的学科, 而力学始终是其重要内涵. 由于磁流体力学固有的强非线性集体相互作用的特征, 必须通过实验诊断、理论和数值模拟三种研究手段的密切配合, 才能完成研究目标⁴⁾.

1) Zhang J, Ni M J. Direct simulation of multi-phase MHD flows on an unstructured cartesian adaptive system. submitted to J Comp Phys for review, 2013

2) Wang Z H, Meng X, Wang S D, Ni M J. Experiment study of gas rise velocity of liquid metal in a strong magnetic field. submitted to Fusion Eng, Design for review

3) Zhang J, Ni M J. Direct simulation of single bubble motion under vertical magnetic field: Paths and wakes. submitted for review

4) “等离子体力学”, 由中国科技大学俞昌旋(高温)、清华大学陈熙、蒲以康(低温)、北京大学王晓钢(空间/天体)供稿, 由中国科学院力学研究所吴承康浓缩合成

参考文献

- 1 中国科学院力学研究所主编. 郭永怀先生诞辰一百周年纪念文集. 北京: 中国科学院力学研究所, 2009
- 2 邱励俭. 聚变能及其应用. 北京: 科学出版社, 2007
- 3 Batchelor G K, Moffatt H K, Worster M G. Perspectives in fluid dynamics: A collective introduction to current research. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
- 4 Molokov S, Moreau R. Magnetohydrodynamics: Historical evolution and trends. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007
- 5 李家春. 中国学科发展战略——流体动力学. 北京: 科学出版社, 2013
- 6 倪明玖. 磁约束核聚变关键能量转换部件的磁流体力学研究. 力学与实践, 2010, 32(5): 1–10
- 7 严建成, 刘永, 周才品, 等. 中国环流器二号 A 装置(HL-2A)工程研制. 核聚变与等离子体物理, 2004, 24(4)
- 8 Wan Y X, Li J G, Weng P D. First engineering commissioning of EAST Tokamak. Plasma Sci Tech, 2006, 8: 253–254
- 9 Abdou M A, Ying A, Morley N B, et al. On the exploration of innovative concepts for fusion chamber technology. Fusion Eng Design, 2001, 54: 181–247
- 10 Mattas R F, Allain J P, Bastasz R, et al. ALPS-advanced limiter-divertor plasma-facing systems. Fusion Eng Design, 2000, 51–52: 127–134
- 11 Majeski R, Jardin S, Kaita R, et al. Recent liquid lithium limiter experiments in CDX-U. Nucl Fusion, 2005, 45: 519–523
- 12 Allain J P, Whyte D G, Brooks J N. Lithium erosion experiments and modelling under quiescent plasma conditions in DIII-D. Nucl Fusion, 2004, 44: 655–664
- 13 Krasheninnikov S I, Zakharov L E, Pereverzev G V. On lithium walls and the performance of magnetic fusion devices. Phys Plasmas, 2003, 10: 1678–1682
- 14 Li J G, Wan B N. Recent progress in RG heating and long-pulse experiments on EAST. Nucl Fusion, 2011, 51: 094007
- 15 Buceniks I, Lielausis O, Platacis E, et al. An experimental study of liquid metal film and jet flows in a strong magnetic field. Magnetohydrodynamics, 1994, 30: 219–230
- 16 Hu J S, Zuo G Z, Li J G, et al. Investigation of lithium as plasma facing materials on HT-7. Fusion Eng Design, 2010, 85: 930–934
- 17 Greenwald M, Callis R, Dorland D W, et al. Priorities, Gaps and Opportunities: Towards A Long-Range Strategic Plan for Magnetic Fusion Energy. Technical Report, Fusion Energy Sci, Advisory Committee. DOE/SC-102 2007
- 18 Feng K M, Pan C H, Zhang G S, et al. Progress on solid breeder TBM at SWIP. Fusion Eng Design, 2010, 85: 2132–2140
- 19 Wu Y C, FDS Team. Conceptual design and testing strategy of a dual functional lithium-lead test blanket module in ITER and EAST. Nucl Fusion, 2007, 47: 1533–1539
- 20 Rampal G, Li Puma A, Poitevin Y, et al. HCLL TBM for ITER-design studies. Fusion Eng Design, 2005, 75–79: 917–922
- 21 Abdou M A, Sze D, Wong C, et al. US plans and strategy for ITER blanket testing. Fusion Sci Tech, 2005, 47: 475–487
- 22 Smolentsev S, Moreau R, Abdou M. Characterization of key magnetohydrodynamic phenomena in PbLi flows for the US DCLL blanket. Fusion Eng Design, 2008, 83: 771–783
- 23 Bühler L. Liquid metal magnetohydrodynamics for fusion blanket. In: Molokov S, Moreau R, eds. Magnetohydrodynamics: Historical Evolution and Trends. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2007
- 24 Sussman M, Smerek P, Osher S. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow. J Comp Phys, 1994, 114: 146–159
- 25 Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. J Comp Phys, 1981, 29: 201–225
- 26 Müller U, Bühler L. Magneto-fluid-dynamics in Channels and Containers. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2001
- 27 Moreau R J. Magnetohydrodynamics. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1990
- 28 Shercliff J A. Steady motion of conducting fluids in pipes under transverse magnetic fields. Proc Cambridge Philosophical Soci, 1953, 49: 126–144
- 29 Hunt J C R. Magnetohydrodynamic flow in rectangular ducts. J Fluid Mech, 1965, 21: 577–590
- 30 Ludford G S S. The effect of a very strong magnetic cross-field on steady motion through a slightly conducting fluid. J Fluid Mech, 1960, 10: 141–155
- 31 Malang S, Leroy P, Casini G P, et al. Crucial issues on liquid metal blanket design. Fusion Eng Design, 1991, 16: 95–109
- 32 Xu S J, Ni M J. Direct simulation of MHD flows in dual-coolant liquid metal fusion blanket using a consistent and conservative scheme. Theore Appl Mech Lett, 2011, 1: 012006
- 33 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 Design, 2013, 88: 271–275
- 34 Li F C, Sutevski D, Smolentsev S, et al. Experimental and numerical studies of pressure drop in molten PbLi flows in a circular duct under non-uniform transverse magnetic field. Fusion Eng Design, 2013, 88: 3060–3071
- 35 Bühler L. The influence of small cracks in insulating coatings on the flow structure and pressure drop in MHD channel flows. Fusion Eng Design, 1995, 27: 650–658
- 36 Bühler L, Horanyi S. Experimental Investigations of MHD Flows in a Sudden Expansion. Technical Report, FZKA-7245. 2006
- 37 Messadek K, Abdou M A. Experimental study of MHD flows in a prototypic inlet manifold section of the DCLL test blanket module. Magnetohydrodynamics, 2009, 45: 233–238
- 38 Mistrangelo C. Topological analysis of separation phenomena in liquid metal flow in sudden expansions Part 2 magnetohydrodynamic flow. J Fluid Mech, 2011, 674: 132–162
- 39 Morley N B, Ni M J, Munipalli R, et al. MHD simulations of liquid metal flow through a toroidally oriented manifold. Fusion Eng Design, 2008, 83: 1335–1339
- 40 Dousset V, Pothérat A. Formation mechanism of hairpin vortices in the wake of a truncated square cylinder in a duct. J Fluid Mech, 2010, 653: 519–536

- 41 Votyakov E V, Kolesnikov Y, Andreev O, et al. Structure of the wake of a magnetic obstacle. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 144504
- 42 Zhang X D, Huang H L. Blockage effects on viscous fluid flow and heat transfer past a magnetic obstacle in a duct. *Chin Phys B*, 2013, 22(7): 075202
- 43 Jaworski M A, Gray T K, Antonelli M, et al. Thermoelectric magnetohydrodynamic stirring of liquid metals. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 094503
- 44 Zakharov L E, Jaworski M. Design guidance for the flowing lithium systems in Tokamaks. In: the Proceedings of 2nd International Symposium on Lithium Applications for Fusion Devices. 2011
- 45 Tao Z, Ni M J. Analytical solutions for MHD flow at a rectangular duct with unsymmetrical walls of arbitrary conductivity. *Sci China Physics, Mechanics & Astronomy*, in press
- 46 Kulikovskii A G. Slow steady flows of a conducting fluid at large hartmann numbers. *Fluid Dyn*, 1968, 3: 1–5
- 47 Molokov S, Bühler L. Liquid metal flow in a U-bend in a strong uniform magnetic field. *J Fluid Mech*, 1994, 267: 325–352
- 48 Reed C B, Picologlou B F, Hua T Q, et al. ALEX results-A comparison of measurements from a round and a rectangular duct with 3-D code predictions. In: the Proceedings of 12th Symposium on Fusion Engineering, 1987
- 49 许增裕, 潘传杰, 张秀杰, 等. 通道插件管道 MHD 效应初步实验结果. *核聚变与等离子体物理*, 2009, 29: 6–9
- 50 Huang Q Y, Zhang M L, Zhu Z Q, et al. Corrosion experiment in the first liquid metal LiPb loop of China. *Fusion Eng Design*, 2007, 82: 2655–2659
- 51 Takeda Y. Velocity profile measurement by ultrasound doppler shift method. *Int J Heat Fluid Flow*, 1986, 7: 313–318
- 52 Takeda Y. Development of an ultrasound velocity profile monitor. *Nucl Eng Design*, 1991, 126: 277–284
- 53 Eckert S, Gerbeth G. Velocity measurements in liquid sodium by means of ultrasound doppler velocimetry. *Exper Fluids*, 2002, 32: 542–546
- 54 Tóth G. The $\Delta B=0$ constraint in shock-capturing magnetohydrodynamics codes. *J Comp Phys*, 2000, 161: 605–652
- 55 Ni M J, Munipalli R, Morley N B, et al. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at low magnetic reynolds number Part I: on a rectangular mesh. *J Comp Phys*, 2007, 227: 174–204
- 56 Ni M J, Munipalli R, Huang P, et al. A current density conservative scheme for incompressible MHD flows at low magnetic reynolds number Part II: on an arbitrary collocated mesh. *J Comp Phys*, 2007, 227: 205–228
- 57 Munipalli R, Huang P, Ni M J, et al. Physical model Development and Benchmarking for MHD Flows in Blanket Design. Technical Report, Physical Model Development and Benchmarking for MHD Flows in Blanket Design. 2007
- 58 Mas de les Valls E, Batet L, de Medina V, et al. Modelling of integrated effect of volumetric heating and magnetic field on tritium transport in a U-bend flow as applied to HCLL blanket concept. *Fusion Eng Design*, 2011, 86: 341–356
- 59 Kinet M, Knaepen B, Molokov S. Instabilities and transition in magnetohydrodynamic flows in ducts with electrically conducting wall. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 154501
- 60 Mistrangelo C, Bühler L. Numerical investigation of liquid metal flows in rectangular sudden expansions. *Fusion Eng Design*, 2007, 82: 2176–2182
- 61 Francois M, Cummins S, Dendy E, et al. A balanced- force algorithm for continuous and sharp interfacial surface tension models within a volume tracking framework. *J Comp Phys*, 2006, 213: 141–173
- 62 Ni M J. Consistent projection methods for variable density incompressible Navier-Stokes equations with continuous surface forces on a rectangular collocated mesh. *J Comp Phys*, 2009, 228: 6938–6956
- 63 Zhang J, Ni M J. A consistent and conservative scheme for MHD flows with complex boundaries on an unstructured Cartesian adaptive system. *J Comp Phys*, 2014, 256: 520–542
- 64 Zhang C, Eckert S, Gerbeth G. Experimental study of single bubble motion in a liquid metal column exposed to a dc magnetic field. *Int J Multiphase Flow*, 2005, 31: 824–842
- 65 Zhang C, Eckert S, Gerbeth G. The flow structure of a bubble-driven liquid metal jet in a horizontal magnetic field. *J Fluid Mech*, 2007, 575: 57–82

Liquid metal hydrodynamics relevant to R&D of magnetocondined fusion reactor

NI MingJiu *

School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Magnetoconfined fusion is introduced with focus on its fluid mechanics and heat transfer problems relevant to fusion liquid lithium-lead blanket and liquid lithium first wall. Experimental and numerical MHD is briefly reviewed.

magnetoconfined fusion, magnetohydrodynamics, liquid lithium-lead blanket, liquid lithium first wall

PACS: 47.65.-d, 52.55.Fa, 44.35.+c

doi: 10.1360/132013-148