机械工程

铅铋冷却快堆主换热器流热耦合特性仿真与结构改进设计

丁乾坤
中国核动力研究设计院　四川成都　610200

【摘　要】铅铋（Pb-Bi）冷却快堆具有本质安全性高、结构紧凑和模块式能量供给能力强等优点，是当前我国先进核电发展的重要趋势。作为一、二回路能源传输的关键装置，主换热器的流动－传热性能将对反应器的热力性能和安全运行产生重要的作用。以Pb-Bi快堆为研究对象，通过构建全流程的流－热耦合数值模拟方法，深入分析初始结构中的流动-热力耦合问题及其产生机制。从流场调控、管束构型、参数匹配、复合结构耦合等方面，研究并建立适用于液体Pb-Bi电介质的结构优化设计方法。研究成果将为Pb-Bi快堆高效稳定的主换热器结构设计奠定基础。

【关键词】铅铋冷却快堆；主换热器；流热耦合特性；仿真；结构改进

Simulation and Structural Improvement Design of Flow-Thermal Coupling Characteristics for the Main Heat Exchanger in Lead-Bismuth-Cooled Fast Reactors

Ding Qiankun
China Nuclear Power Research and Design Institute, Chengdu, Sichuan　610200.

【Abstract】Lead-bismuth (Pb-Bi) cooled fast reactors offer significant advantages such as high inherent safety, compact structure, and strong modular energy supply capability, making them a key trend in China's advanced nuclear power development. As a critical component for energy transfer between the primary and secondary circuits, the flow-thermal performance of the main heat exchanger plays a vital role in the reactor's thermodynamic performance and safe operation. Using Pb-Bi fast reactors as the study subject, this paper develops a comprehensive numerical simulation method for flow-thermal coupling to thoroughly analyze the flow-thermal coupling issues and their underlying mechanisms in initial designs. From aspects such as flow field regulation, tube bundle configuration, parameter matching, and composite structural coupling, a structural optimization design methodology tailored for liquid Pb-Bi dielectrics is established. These findings will lay a solid foundation for the efficient and stable structural design of main heat exchangers in Pb-Bi fast reactors.

Keywords: Lead-bismuth cooled fast reactor; Main heat exchanger; Flow-heat coupling characteristics; Simulation; Structural improvements

随着核能的低碳化和模块化发展，铅铋快堆因其常压运行、良好的被动安全性和显著的堆芯安全特性而成为新一代微型模块化堆的发展趋势。主换热器是快堆换热装置中的核心压力传热装置，担负着一回路中高温铅铋型制冷剂和二回路产热工质之间的换热作用，其工作特性的好坏将影响到整个装置的能量效率和使用寿命。与传统水力换热器相比，具有小普朗特数工质的液体铅铋流体流动与换热特征明显差异，其传热主要由分子传导主导，湍流扰流对其强化作用有限，且现有换热器存在流场偏斜、局部高温积聚和换热死区等多个相互影响的问题。

一、铅铋冷却快堆主换热器数值仿真模型构建

（一）铅铋冷却快堆主换热器模型与边界工况定义

铅铋冷却快堆主换热器一回路壳侧通高温液态铅铋（Bi），二回路管侧介质选用超临界二氧化碳（sCO_2），与小规模 Pb–Bi 快堆热负荷 80 MW 的设计要求相结合。基本结构尺寸是根据中广核 Pb–Bi 快堆试样设计的，其传热管外径 16 毫米，壁厚 1.2 毫米，有效管长 6.2 米，管束正三角形布置，横截面直径比 1.35，纵向截面直径比为 1.35，截面直径 1.12 米，入口和出口流动通道的直管段直径分别为 0.8 米[1]。对法兰、螺栓等非关键受力构件进行简化，将管束、折流板、进出口分配腔、导流基座等与流动 – 传热过程有密切联系的部分保持完整，并利用 SolidWorks 对其进行三维有限元分析，并将其引入 Fluent 进行数值模拟。壳体一侧 LBE 进口温度为 540℃，质量流速为 158kg/s；在管内壁为非滑动界面，在固壁区域为共轭换热耦合界面，以降低界面热阻的影响。

（二）基本方程，物理性质和数值模式的选择

流体 – 热力耦合方程组包含连续性方程、动量 N–S 方程和能量守恒方程；在液体流体中选取与 LBE 小普朗特数

流场换热特性相适应的 SSTk- omega 模式；基于 Cheng 的普朗特数改进模式，对流体界面的热传导占优作用进行校正[2]。利用 OECD-NEA2015 标准对 LBE 的变物理量进行拟合。核心物性关联式：密度$\rho = 11065 - 1.2793T$、动力粘度$\mu = 4.94 \times 10^{-4}\exp(754.1/T)$,$sCO_2$ 物性参考 REFPROP10 数据库，覆盖 300 - 600℃、16 - 20MPa 区间物性插值。

二、铅铋冷却快堆主换热器流热耦合特性仿真以及工作机理分析

（一）额定条件下全区域内的流场和温度场分布

正常额定情况下，壳体侧 LBE 的主要流动速度为 0.32-0.76 m/s，在管束尾部和折流板根部处出现了大范围的低速流动区域，在壳体一侧流动区域中，速度小于 0.08m/s 的区域为 11.8%，滞留区的紊流程度小于 0.02，大大降低了对流动传热的影响。由压强曲线可以看出，在管道束缩段内，流动出现了一个较低的速度区域，入口和出口的总压降为 42.63 kPa，其中入口占 37.2%和 62.8%[3]。其内部的温度分布具有明显的分区不均匀特点：进口侧壁面的平均温差为 86 K，而在中间的侧壁面则低达 41 K，而在出口侧的滞止区，管壁的温差又回到 72 K，部分地方的壁温则达到 618 K。区域内的热传递系数计算表明，整个区域的热传递阻力为 0.000421 m^2• K/W，而在管道侧面，sCO_2 管壁上的流动阻力分别为 76.3%、14.2%和 9.5%。

（二）流阻及传热特性的定量研究

研究 LBE 在不同工况（130-180 kg/s）条件下的流动特性和传热特性，揭示流动速度对流动 - 传热特性的影响机理。结果表明：随着壳体内流体流动的增大，壁面雷诺数 Re 从 22600 增加到 49300，摩阻因子从 0.372 减小到 0.291，进口和出口的压降从 31.47 增加到 47.19 kPa；结果表明，该换热器的整体传热系数从 2368 W/（m^2・K)提高到 3154 W/（m^3. K）。当流体流速增加 10 kg/s 时，整体传热系数增加 5.2%，压力损失增加 3.1 kPa，其流速增加速度小于传热增强速度，但在大流量条件下，泵能耗明显增加，能耗降低，具体见表 1。

表 1　原始结构换热器额定工况核心热工水力参数

性能参数	数值单位	原始模型计算值	同工况实验基准值	相对误差
壳侧总压降	kPa	42.63	40.89	4.3%
总换热系数	$W・m^{-2}・K^{-1}$	2,876.00	2,792.00	3.0%
壳侧平均 Nu	——	174.30	169.10	3.1%
低速死区体积占比	%	11.80	12.40	-4.8%
sCO_2 侧对流热阻占比	%	76.30	77.10	-1.0%
换热器综合 JF 因子	——	0.02	0.02	2.8%

从表 1 可以看出，原管束组的主要缺点是：一是由于流动区域的不均，造成了较大范围的热死区，导致有效换热面积的利用率达 89%；其次，由于管束断面的突然变化导致的局部阻力较大，JF 的整体性能系数较差，难以在传热和损失之间达到均衡匹配。

三、铅铋冷却快堆主换热器结构改进设计

（一）入口流场增设弧形导流整流结构

原设计的主换热装置不匹配进口校正部件，液体 Pb-Bi 通过管路被冲刷到管束区，射流撞击作用强烈，导致套管断面的流动分配出现严重的分层现象，上部和下部流动速度相差很大。由于管道一侧的流动较为密集，管道一侧的压力损失较大，造成了较大的压力损失，使得套管上方的流动供应不充分，导致长时间的低速流动[4]。由于滞止区内的液体混合较差，阻碍了传热过程，且在较长时间的使用过程中，由于局部温度的不平衡，极容易引起管道内壁的高温腐蚀，严重影响了装备的长周期安全。为克服进口流场分布不平衡和局部阻力偏大等内在缺点，提出了在壳体进口分配室与管束间设置分片弧型导流板的方法，见图 1。本项目突破了常规直流型诱导液体二次分流的缺陷，提出了一种以连续弧形表面为导向，削弱了高速流动对管道端面的直接影响。在设计时，通过对壳体内径进行匹配，通过介质流量区间来决定导流板的曲率、安装高度和侧壁面的间距，借助弧形表面的梯度引导，实现 Pb-Bi 液体在壳体横断面上的均匀分布，从而解决单向射流的问题。

（二）利用螺旋形平管扰流加强的传热管束布局的优化

常规主流换热器均以平滑的圆钢管为传热单元，当液体 Pb-Bi 沿壁面冲击时，会在壁面上产生一种相对稳定的流动附面层，传热严重受制于附面层的热传导，壳体表面传热性能面临显著的瓶颈。换热器尾段存在着连续的尾迹涡和大区域低速换热死区，导致传热区域不能充分发挥作用。如果单

纯通过增大工质的流速来增强传热，则会使一回路的功率消耗同时显著增大，且传热效率与流体损失之间难以均衡，使其整体热力特性有缺陷。改造方案是采用整体式螺旋扁型异型传热管代替所有的平滑直管，换热管本体为平板状，在其整个轴线方向上设有一系列的螺纹凸出表面，并能完全涵盖整个传热段。Pb–Bi 液体在管道中流动时，壁面上的螺旋形表面不断地对液体进行剪切干扰，不断打破近壁面的稳定性，促使高温主流和近壁面的冷媒完全混合，从而提高了近壁面的湍流强度。在此基础上，利用螺旋形的方式，通过改变管内流动的路径，破坏其尾端的定涡，从而解决了管内的热死区问题，实现了在传热单元层次上的整体传热。扁平螺纹管不需要对换热器壳体和管束的间距进行调节，可以替代原来的管道部件，使其加工技术更加完善，符合核电装备的生产规范。



图 1　分片弧形导流板

（三）管束排布参数优化

单纯增加导流结构和替换异型管束只能改善局部区域内的流动分布并强化传热，如果两个重要结构尺寸不协调，将导致传热提升幅度过小、流动阻力过大、热负荷不均匀等问题。针对受限空间、压力降约束和高温安全极限等多种约束，以多目标优化思想为指导，以系统的传热和操作能量为目的，进行管束芯结构的系统匹配设计。选择三个主要的结构参量，即管节直径比、螺旋管螺旋升角和横向管间距，并按照核电压力容器加工工艺规范、液态金属流动基本原理和 Pb–Bi 堆的热工安全性设计需求进行综合考虑。最优设定的多种硬限制条件：换热器外径和有效换热距离相同，不会增加机房布局面积；对主循环泵的能量消耗进行了有效地控制；在此基础上，研究了两种材料在不同条件下的性能变化规律。通过设定合适的参数取值范围，实现了多套参数的比较和优选，得到了与该装置工作条件相适应的最佳参数配置。通过对其进行多个参量的联合调控，可有效抑制异型螺旋管引起的沿程摩阻增大、管道间流动空间不平衡、防止局部流动速度太高或太小的问题，使其达到最佳的强化作用。

（四）集成导流板和异型管的改善

单个圆弧形流动通道只能实现进口流动的平衡调节，而对流动传热的增强作用十分有限；单纯替换扁平螺旋管束会使管道的总流阻超过设计极限；简单地调节管束布置的参数只能在一定程度上缓解系统的特性冲突，而三种单独的方法都不能同时处理流场倾斜、传热效率低、阻力损失大等多个因素的相互影响。针对上述三种改良方法的优缺点，采取综合组合优化思想，将弧形导波型和螺旋型平管束组合起来，形成层次式的协调优化系统。该组合优化方法集成了预均流部件和尾部增强传热管束，完全利用最佳导流曲率、螺旋上升角度和节径布置等参数，实现“进口均匀分布，管间湍流增强”的分层优化思路。采用先进的弧形导流片对流动进行校正，消除了射流冲击、流动分层和高压力停滞区，减小了整体的局部阻力，保证了管束区的均匀、稳定的来流；尾部螺旋形扁平管束在流动中不断地撕开流动附面层，消除尾迹涡，全面提高传热效率。

四、结束语

针对铅铋冷却快堆主换热过程中存在的流量分配不均、热死区多、流量损失大等问题，通过研究弧型导流器均流、螺旋扁管强化换热、管束参数匹配、复合集成改进等四个关键技术，通过相互协同作用，在保证装置总体结构不变的情况下，提高其内部的流动和换热性能。该组合结构可在保证传热效率和操作阻力的前提下，有效抑制因局部温度升高而引起的金属侵蚀，提高其在变负载下的稳定工作。该研究为小尺寸 Pb–Bi 快堆热交换装置提供了一种完善的改造思想。目前的研究还很薄弱，未来可以结合结构振动和长期腐蚀等因素对其进行更深层次的研究，从而对整个装备的生命周期安全性评价系统进行改进。

参考文献

[1]陈祖国, 乔鹏瑞, 路远, 等. 铅铋快堆燃料组件模拟件热工水力特性分析[J]. 原子能科学技术, 1–8.
[2]吴世发, 解景尧, 万甲双, 等. 铅铋快堆一回路冷却剂温度稳态运行方案控制特性研究[J]. 核技术, 2025, 48 (10): 145–158.
[3]陈佳杰, 王世伟, 何辉, 等. 缓解铅铋快堆冷却剂腐蚀的最优化氧含量控制策略研究[J]. 核动力工程, 2024, 45 (6): 280–289.
[4]王舒婷, 匡波, 王欣. 液态铅铋合金自然循环实验与数值模拟[J]. 应用科技, 2023, 50 (4): 44–52+108.