

引用格式: 张豪磊, 周涛, 薛春辉, 等. 聚变堆包层模块第一壁不同冷却剂传热性能研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(3): 75-80. ZHANG Haolei, ZHOU Tao, XUE Chunhui, et al. Research on heat transfer performance of different coolants for the first wall of the test blanket module of nuclear fusion reactor [J]. Southern energy construction, 2024, 11(3): 75-80. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.08.

聚变堆包层模块第一壁不同冷却剂传热性能研究

张豪磊^{1,2,3}, 周涛^{1,2,3,✉}, 薛春辉^{1,2,3}, 刘鹏^{1,2,3}

(1. 东南大学 能源与环境学院核科学与技术系, 江苏 南京 211189;

2. 核热工安全与标准化研究所, 江苏 南京 211189;

3. 大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心, 江苏 南京 211189)

摘要: [目的]核聚变作为一种清洁、高效的能源,是实现全球可持续发展的未来希望。针对中国氦冷固态增殖剂包层模块的第一壁,基于核热工安全与标准化研究团队提出的4根冷却剂道的设计方案,计算了氦气、氩气、氮气作为冷却剂的温度场。[方法]选择B.S.Petukhov公式,计算聚变堆包层模块第一壁不同冷却剂的传热性能。[结果]研究表明:氦气、氩气、氮气作为冷却剂,致使Be板和RAFM钢中温度场的变化趋势是相似的;温度场出现的最大温度均小于许用温度,符合温度的安全要求;氮气作为冷却剂可以实现的安全裕度是最大的,氩气次之,氦气实现的安全裕度相较偏小。[结论]可由此对聚变堆实验包层第一壁的冷却剂选择提供更多的优化可能,对聚变堆实验包层第一壁的安全增加更多的裕度。

关键词: 核聚变; 第一壁; 氦气; 氩气; 氮气; 冷却剂

中图分类号: TL4; TK11+2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)03-0075-06

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.3.08

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Heat Transfer Performance of Different Coolants for the First Wall of the Test Blanket Module of Nuclear Fusion Reactor

ZHANG Haolei^{1,2,3}, ZHOU Tao^{1,2,3,✉}, XUE Chunhui^{1,2,3}, LIU Peng^{1,2,3}

(1. Department of Nuclear Science and Technology, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

2. Institute of Nuclear Thermal-hydraulic Safety and Standardization, Nanjing 211189, Jiangsu, China;

3. National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety, Nanjing 211189, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] As a clean and efficient energy source, nuclear fusion promises to achieve global sustainable development in the future. For the first wall of Chinese helium-cooled solid breeder test blanket module, the temperature fields of helium, argon and nitrogen as coolants were calculated based on the design scheme of four coolant channels proposed by the Nuclear Thermal Security and Standardization Research Team. [Method] To calculate the heat transfer of different coolants in the first wall of the cladding module of fusion reactor, the B.S. Putukhov formula is used to calculate the heat transfer. [Result] Research indicates that the temperature field variations in the Be panel and RAFM steel are similar for helium, argon, and nitrogen as coolants. The maximum temperatures in the temperature fields are below the allowable temperature, meeting the safety requirements for temperatures. Nitrogen as a coolant offers the largest safety margin, followed by argon, with helium presenting a relatively smaller safety margin. [Conclusion] This study provides more optimization options for selecting the coolant for the first wall of the test blanket module of nuclear fusion reactor, thereby

收稿日期: 2024-04-15 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 江苏省双创人才经费“多介质颗粒物流动换热特性研究”(110300297); 科技部重点研发计划“固有安全模块化金属弥散热管反应堆设计技术”(2020YFB1901700); 中核科技工业核动力技术创新中心项目“基于相场-流场耦合的相分离组织演变模拟技术”(6903003092)

enhancing the safety margin of the first wall of the test blanket module of nuclear fusion reactor.

Key words: nuclear fusion; the first wall; helium; argon; nitrogen; coolant

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

2020年,习近平总书记在第75届联合国大会上庄严承诺,中国将争取于2030年前使二氧化碳排放达到峰值,争取2060年前实现碳中和。2022年,第二十次全国代表大会上报告提出“积极安全有序发展核电”。2023年,习近平总书记在考察调研时提出“新质生产力”的科学内涵。2024年3月5日,国务院总理李强在十四届全国人大二次会议中指出,我国的第四代核电机组等高端装备研制取得长足进展。核电已经成为我国推进绿色发展、实现“双碳”目标、优化能源结构的重要选择。核聚变是一种清洁、高效的能源,是实现全球可持续发展的关键。ITER是目前正在建设的世界上最大的实验性托卡马克核聚变反应堆。它的实验包层模块是ITER的一个核心部件,其设计对于实现聚变堆的自给自足生产氦、高效能量提取并转换为电能具有至关重要的意义。此外,ITER实验包层模块项目^[1-6]的成功实施,将为未来的DEMO堆包层技术的开发和发展提供可靠的支持,而且已有学者^[7-8]对于聚变发电厂进行概念设计和布置优化。ITER实验包层模块的第一壁^[9-10]是整个包层模块的重要组成部分,起到了关键的作用,整个实验包层模块安全运行与第一壁的安全性直接相关。李敏^[11]对典型包层模块进行了热工水力学分析研究,采用多层U形球床作为氦增殖区结构,使包层结构更加简单。党春辉等^[12]把中国低活化马氏体钢用作超临界水冷包层第一壁结构材料进行热与应力性能分析。魏川子^[13]提出对CFETR液态包层的结构设计方案。王苏豪^[14]提出了一种氦冷固态氦增殖剂包层设计方案,该方案增殖性能更好,可以满足聚变堆的热电转换需求。核热工安全与标准化研究团队^[15]基于中国氦冷包层模块第一壁的设计方案,通过计算和分析,得到第一壁的温度场分布情况,提出了4根冷却剂通道的优化设计方案,该设计方案与3根管道的设计相比能节省材料且有更好的温度安全裕度。通过在4根冷却剂通道的设计方案的基础上,对聚变堆实验包层模

块第一壁不同冷却剂传热性能进行研究。聚变堆实验包层模块第一壁负有高强度的中子和表面热载荷^[16],在运行中,第一壁的温度场中的最高温度必须低于所使用材料的温度极限要求,因此对于聚变堆实验包层模块第一壁不同冷却剂传热性能的研究,具有重要价值。

1 几何模型

1.1 中国固态增殖剂包层模块第一壁冷却回路

2006年,王小宇等^[17]对中国氦冷固态增殖剂包层模块第一壁进行了热力学和力学分析,提出了冷却回路设计。如图1所示。

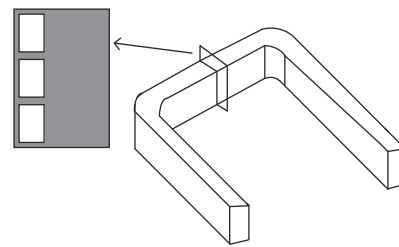


图 1 第一壁冷却回路

Fig. 1 Cooling loop of the first wall

在图1的设计中,每组冷却回路包括3根并排的管道。对于第一壁材料的选取,在面向等离子体的一侧设计了2 mm厚的Be保护板,向外侧延伸设计了3 mm厚的弱活性铁素体钢(RAFM钢)。

1.2 第一壁5通道设计回路

2009年,赵周等^[18]提出一种5通道回路设计方案,如图2所示。

从图2可以看出,此设计方案采用5根冷却剂管道,串联形成一个循环回路来进行冷却剂的流通。对第一壁的热力学和力学分析表明,第一壁Be保护板的应力偏大,从材料设计角度出发建议采用钨铜合金代替Be作为第一壁的保护材料更合适。

1.3 第一壁4通道设计回路

核热工安全与标准化研究团队^[15]选取1组冷却剂管回路作为研究几何模型,该几何模型由4根冷却剂管道构成。如图3所示。

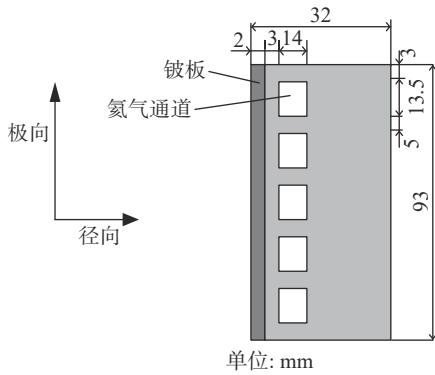


图2 第一壁面5通道回路

Fig. 2 5-channel loop of the first wall

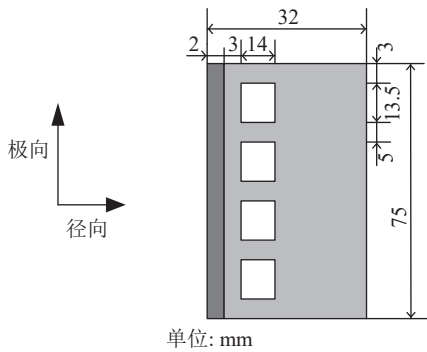


图3 第一壁4通道设计回路

Fig. 3 Design 4-channel loop of the first wall

从图3可以看出,第一壁的极向总尺寸与3根和5根冷却剂设计方案相同,在第一壁面向等离子体的一侧加装2 mm厚的Be保护板,铍板后面是3 mm厚的弱活性铁素体钢(RAFM钢),这种设计是与3根和5根冷却剂设计方案保持了高度的一致性。对于管道径向尺寸,定为14 mm,后冷却剂管道的宽度采取13.5 mm,与前面的方案一致。对于4根管道的径向尺寸,设计为14 mm,冷却剂管道的宽度设计为13.5 mm,将管道间距设计为5 mm。

2 计算公式

2.1 努塞尔数经验公式

根据中国氦冷固态增殖剂包层模块的计算,选择B.S.Petukhov公式,如式(1)和(2)所示。

$$Nu = \frac{(f/8)RePr}{1.07 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{1/2} - 1)} \quad (1)$$

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}} \quad (2)$$

式中:

Nu ——努塞尔数;

f ——摩擦系数;

Re ——雷诺数;

Pr ——普朗特数。

该公式的适用范围是 $0.5 < Pr < 2000$, $10^4 < Re < 5 \times 10^6$ 。B.S.Petukhov公式形式虽较为复杂,但误差可达10%以下,精度较高,同时计算值偏小,从而结果更加保守。

2.2 温度场数学描写

对于几何模型的温度场数学描述,在图3中,以径向为 x 轴,以铍板最左侧为坐标原点,温度沿 x 轴变化,为一维导热。由于 $0 \leq x \leq 5$ mm 的范围内未出现温度过高点,则其他的范围也是安全的,所以针对 $0 \leq x \leq 5$ mm 的范围展开计算。如式(3)~(6)所示。

$$h(t - t_\infty) = q \quad (3)$$

$$x = 0, -\lambda_1 \frac{dt}{dx} = q \quad (4)$$

$$x = 2, -\lambda_2 \frac{dt}{dx} = q \quad (5)$$

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 0 \quad (6)$$

式中:

H ——对流传热系数($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$);

T ——温度($^\circ C$);

t_∞ ——冷却剂通道中冷却剂的最高温度($^\circ C$);

Q ——热流密度(MW/m^2);

λ_1, λ_2 ——铍板和 RAFM 钢的导热系数, ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$);

x ——距离(mm)。

如图3所示, $x = 0$ 表示该位置在第一壁中的最左端, $x = 2$ 表示该位置与第一壁有2 mm的距离。

2.3 物性参数

物性参数是聚变堆包层模块第一壁不同冷却剂的传热性能计算的基本^[19-21],给定热流密度 $q = 0.5$ MW/m^2 ,冷却剂流速 $u = 56.69$ m/s,进口温度为 300 $^\circ C$ 。

材料Be与RAFM钢的部分性质如表1所示。

表1 第一壁材料的性质

Tab. 1 Physical properties of the first wall materials

材料	热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	许用温度/ $^\circ C$
Be	111.6	800
EUROFER97	29.2	550

3 计算结果与分析

3.1 氦气作为冷却剂的计算结果

将氦气作为冷却剂, 为了达到总热量的恒定传输, 把冷却剂回路的进口温度设计为 300 °C, 出口温度设计为 370 °C。由式(1)~(6)计算, 得第一壁温度分布如图 4 所示。

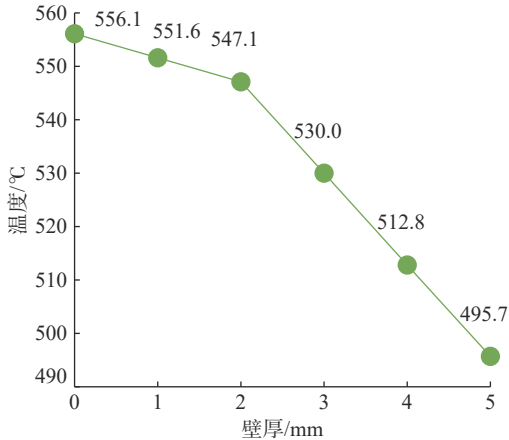


图 4 氦气作为冷却剂的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of helium as a coolant

从图 4 可以看出, 正如图 3 所示的壁厚范围为 0~2 mm 的 Be 板和 2~5 mm 的 RAFM 钢中, 随着 x 的变大, Be 板和 RAFM 钢内部的温度是在线性减小的。但在两种材料中的下降程度不一样, 这是由于两种材料的导热率偏差导致的。第一壁的最高温度在铍板中出现, 为 556.1 °C。RAFM 钢中出现的最高温度为 547.1 °C, 略低于 RAFM 钢的许用温度, 符合安全需要, 但安全裕度较小。

3.2 氩气作为冷却剂的计算结果

将氩气作为冷却剂, 为了达到总热量的恒定传输, 把冷却剂回路的进口温度设计为 300 °C, 出口温度设计为 370 °C。由式(1)~(6)计算, 得到温度分布结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 氩气作为冷却剂时, Be 板和 RAFM 钢内部的温度随着壁厚的增加是在线性减小的, 整体趋势与图 4 相似, 第一壁的最高温度为 454.9 °C, 相较于低于铍的许用温度是低得更多的。RAFM 钢中的最高温度为 445.9 °C, 比 RAFM 钢的许用温度低得更多, 更加符合安全需要的。

3.3 氮气作为冷却剂的计算结果

将氮气作为冷却剂, 为了达到总体热量的恒定

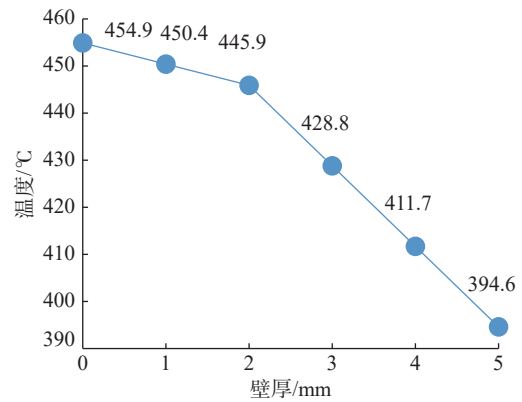


图 5 氩气作为冷却剂的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of argon as a coolant

传输, 把冷却剂回路的进口温度设计为 300 °C, 出口温度设计为 348 °C。由式(1)~(6)计算, 得到温度分布结果如图 6 所示。

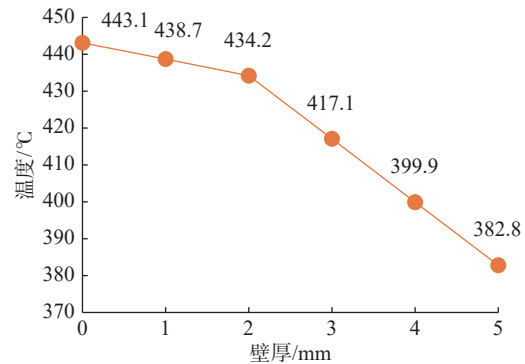


图 6 氮气作为冷却剂的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of nitrogen as a coolant

从图 6 可以看出, 温度场分布整体趋势与图 4 和图 5 相似, 第一壁中出现的最高温度为 443.1 °C, 在 Be 板中出现, 较多地低于铍的许用温度 800 °C。而 RAFM 钢中出现的最高温度为 434.2 °C, 比 RAFM 钢的许用温度是低的, 是符合安全需要的, 安全裕度也相对较大。

3.4 三种冷却剂的对比

选择氦气、氩气、氮气作为第一壁通道冷却剂, 进行计算和对比, 如表 2 和图 7 所示。

从表 2 和图 7 可以看出, 三种冷却剂导致第一壁的温度场变化趋势相似; 对于最大温度, 三种冷却剂均能实现温度安全的要求, Be 板和 RAFM 钢中的最大温度均不超过许用温度, 安全效果较好; 对于安全裕度, 氮气作为冷却剂的效果最好, 可以实现最大

表2 三种冷却剂下第一壁温度分布

Tab. 2 Temperature distribution of the first wall under three coolant options

x/mm	氦气作为冷却剂时	氩气作为冷却剂时	氮气作为冷却剂时
	该点温度/°C	该点温度/°C	该点温度/°C
0	556.1	454.9	443.1
1	551.6	450.4	438.7
2	547.1	445.9	434.2
3	530.0	428.8	417.1
4	512.8	411.7	399.9
5	495.7	394.6	382.8

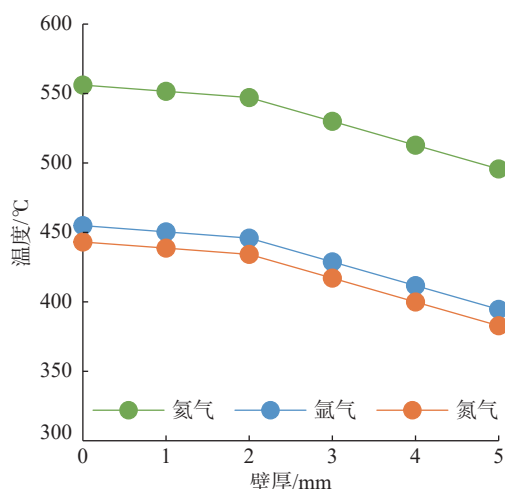


图7 三种冷却剂导致第一壁的温度场变化趋势对比

Fig. 7 Comparison of three coolants in terms of temperature distribution of the first wall

化的安全裕度, 氩气次之, 氮气作为冷却剂实现的安全裕度相较偏小。

4 结论

以中国固态增殖剂包层模块为研究对象, 基于核热工安全与标准化研究团队提出的4根冷却剂道的设计方案, 对不同冷却剂传热性能进行研究。计算了氦气、氩气、氮气作为冷却剂对于第一壁 Be 板和 RAFM 钢的冷却效果。

1) 氦气、氩气、氮气作为冷却剂使 Be 板和 RAFM 钢中温度场的变化趋势是相似的, 在距离第一壁距离 0~5 mm 的范围里, 温度是分两段线性变化的, 在 RAFM 钢中的变化是更剧烈的, 这是由于两种材料的导热率不同导致的。

2) 氦气、氩气、氮气作为冷却剂致使 Be 板和 RAFM 钢中温度场出现的最大温度均小于各自的许

用温度, 符合温度的安全要求。

3) 3种气体作为冷却剂对于 Be 板和 RAFM 钢中温度场分布是有差异的, 氦气作为冷却剂可以实现的安全裕度是最大的, 氩气次之, 氮气实现的安全裕度相较偏小。

参考文献:

- [1] 王俊, 张龙, 王晓宇, 等. ITER 氦冷固态实验包层模块第一壁氢同位素双向输运数值分析 [J]. 核化学与放射化学, 2024, 46(2): 125-130. DOI: 10.7538/hhx.2024.YX.2022057. WANG J, ZHANG L, WANG X Y, et al. Numerical analysis of bi-directional hydrogen isotopes transport in first wall of ITER helium coolant ceramic breeding testing blanket module [J]. Journal of nuclear and radiochemistry, 2024, 46(2): 125-130. DOI: 10.7538/hhx.2024.YX.2022057.
- [2] 郑可. ITER·中国之光——ITER 十年回顾与展望 [J]. 中国核工业, 2018(1): 44. ZHENG K. ITER—Light of China: review and prospect of ITER decade [J]. China nuclear industry, 2018(1): 44.
- [3] 黄传军, 李来风, 吴智雄, 等. 固溶处理对 ITER TF 铠甲材料-316LN 低温断裂延伸率的影响 [J]. 低温物理学报, 2013, 35(2): 117-121. HUANG C J, LI L F, WU Z X, et al. Effect of solution annealing treatment on the cryogenic elongation of ITER TF jacket material-316LN [J]. Low temperature physical letters, 2013, 35(2): 117-121.
- [4] 念飞飞. CFETR 第一壁和偏滤器热负荷数值模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2023.001057. NIAN F F. Numerical simulation of heat flux on the CFETR first wall and divertor [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. DOI: 10.27517/d.cnki.Gzkju.2023.001057.
- [5] 潘咪. ITER 静态磁场测试装置监测保护系统的设计 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2021.001063. PAN M. Design of monitoring and protection system for ITER SMF test facility [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. DOI: 10.27517/d.cnki.gzkju.2021.001063.
- [6] 胡星光, 宋执权, 高格, 等. ITER 聚变装置及其电源系统 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002. HU X G, SONG Z Q, GAO G, et al. ITER fusion device and its power supply system [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 19-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.002.
- [7] 向魁, 梁展鹏, 李华, 等. CFETR 聚变发电厂概念设计技术研究 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(2): 45-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006. XIANG K, LIANG Z P, LI H, et al. Conceptual design technology research of CFETR fusion power plant [J]. Southern energy construction, 2022, 9(2): 45-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.006.

- [8] 李新凯, 向魁, 李华, 等. 聚变发电站总平面布置优化 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(2): 63-69. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.008.
LI X K, XIANG K, LI H, et al. General layout optimization for fusion power plant [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(2): 63-69. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.02.008.
- [9] 赵周, 冯开明, 张国书, 等. 中国 ITER 固态实验包层模块热工水力优化设计和分析 [J]. *核科学与工程*, 2009, 29(4): 299-307. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2009.04.003.
ZHAO Z, FENG K M, ZHANG G S, et al. Thermal-hydraulic optimization design and analysis for the CH HCSB TBM of ITER [J]. *Chinese journal of nuclear science and engineering*, 2009, 29(4): 299-307. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2009.04.003.
- [10] 章毛连. 液态金属 LiPb 实验回路的初步研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
ZHANG M L. Preliminary studies of liquid metal LiPb experimental loop [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2005.
- [11] 李敏. 中国聚变工程实验堆氦冷固态包层结构设计与热工水力分析研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
LI M. Structural design and thermal-hydraulic analysis research of helium cooled solid blanket for CFETR [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [12] 党春辉, 匡波, 魏婷. CLAM 用作超临界水冷包层第一壁结构材料的热与应力性能分析 [C]//北京核学会第十届 (2014 年) 核应用技术学术交流会论文集, 武汉, 2014-11-27. 北京: 《原子能科学技术》编辑部, 2014: 7.
DANG C H, KUANG B, WEI T. Thermal and stress properties of CLAM used as the first wall structural material of supercritical water-cooled cladding [C]//Proceedings of the 10th Beijing Nuclear Society (2014) Nuclear Application Technology Academic Exchange Meeting, Wuhan, November 27, 2014. Beijing: Atomic Energy Science and Technology, Editorial Department, 2014: 7.
- [13] 魏川子. CFETR 液态包层的概念设计和 MHD 效应分析 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
WEI C Z. Conceptual design and MHD analysis of the liquid blanket for CFETR [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [14] 王苏豪. 聚变示范堆 (HCCB-DEMO) 氦冷固态氦增殖包层优化设计研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
WANG S H. Helium cooling ceramic breeder blanket design for fusion DEMO (HCCB-DEMO) [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [15] 周涛, 刘梦影, 廖航涛, 等. 聚变堆实验包层模块第一壁传热结构优化分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(26): 91-95. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.26.018.
ZHOU T, LIU M Y, LIAO H T, et al. Heat transfer structure optimization analysis for the first-wall of fusion power reactor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(26): 91-95. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.26.018.
- [16] 向斌, 冯开明, 叶兴福, 等. 中国氦冷固态实验包层氦气实验回路设计分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2010, 30(1): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2010.01.015.
XIANG B, FENG K M, YE X F, et al. Helium experiment loop of CH HCSB TBM [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2010, 30(1): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2010.01.015.
- [17] WANG X Y, FENG K M, ZHANG G S, et al. Thermal hydraulic and mechanical analysis of CH HCSB TBM [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2006, 26(3): 181-185.
- [18] 赵周, 冯开明, 张国书, 等. 中国 ITER 固态实验包层模块第一壁结构初步分析 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2009, 29(3): 258-263. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2009.03.014.
ZHAO Z, FENG K M, ZHANG G S, et al. Preliminary structure analysis for the first-wall of CH HCSB TBM [J]. *Nuclear fusion and plasma physics*, 2009, 29(3): 258-263. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6086.2009.03.014.
- [19] 冉景煜, 张志荣. 不同物性液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(26): 62-68. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.26.006.
RAN J Y, ZHANG Z R. Numerical study on evaporation characteristics of different substance droplet in low temperature flue gas [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(26): 62-68. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.26.006.
- [20] 李金旺, 邹勇, 程林. 环路热管毛细芯热物性实验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(17): 57-61. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.17.011.
LI J W, ZOU Y, CHENG L. Experimental study on thermo physical properties of capillary wicks for loop heat pipe [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(17): 57-61. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2010.17.011.
- [21] 于平安. 核反应堆热工分析 (3 版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002: 267-269.
YU P A. Nuclear thermal hydraulic analysis (3rd ed.) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2002: 267-269.

作者简介:



张豪磊

周涛 (通信作者)

1965-, 男, 东南大学教授, 博士生导师, 西安交通大学博士, 主要从事核热工与安全分析工作 (e-mail) 101012636@seu.edu.cn。

张豪磊 (第一作者)

2000-, 男, 东南大学动力工程及工程热物理专业博士, 主要从事核热工与安全分析工作 (e-mail) zhangkk2022@126.com。

(编辑 徐嘉铨)