

氘氚聚变中子发生器旋转氚靶传热特性研究

王刚 于前锋 王文 宋钢 吴宜灿

Heat transfer analysis of rotating tritium target of deuterium-tritium fusion neutron generator

Wang Gang Yu Qian-Feng Wang Wen Song Gang Wu Yi-Can

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 102901 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.102901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.102901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于多物理场的 TFC 磁头热传导机理及其影响因素仿真研究

Multiphysics-based simulation on heat conduction mechanism of TFC head and its influencing factors

物理学报.2014, 63(3): 034401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.034401>

反冲质子磁分析技术用于氘氚中子能谱测量研究

Study of magnetic proton recoil technology for measurement of deuterium-tritium neutron spectrum

物理学报.2012, 61(7): 072902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.072902>

D⁺ 离子束轰击时间对氘钛靶特性的影响

Effect of deuterium ion beam bombarding time on characteristic of deuteride titanium target

物理学报.2011, 60(4): 042902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.042902>

氘氘聚变中子发生器旋转氘靶传热特性研究*

王刚† 于前锋 王文 宋钢 吴宜灿

(中国科学院核能安全技术研究所, 中子输运理论与辐射安全重点实验室, 合肥 230031)

(2014年8月28日收到; 2014年12月29日收到修改稿)

强流氘氘中子发生器可用于模拟聚变堆中子环境, 对于开展聚变堆包层材料相关实验研究具有重要意义. 本文提出了一种用于 $10^{12} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级氘氘中子发生器 HINEG (high intensity neutron generator) 的旋转氘靶系统设计方案, 并对其技术难点和强化传热方法进行了介绍. 为考查该氘靶系统的传热特性, 利用 Computational Fluid Dynamics 方法对冷却水层厚度、冷却水层流速和氘靶系统旋转速度对靶面冷却的影响进行了分析, 并对不同热功率密度下靶面的传热过程进行了研究. 结果显示, 大的水层厚度、大的冷却水层流速和高的靶系统旋转速度有利于靶面的冷却, 但水层厚度和水层流速的变化对靶面传热影响较小. 一定条件下靶面所承受的热功率密度不能超过某个限值.

关键词: 氘氘聚变, 中子发生器, 旋转靶, 传热特性

PACS: 29.25.Dz, 44.90.+c

DOI: 10.7498/aps.64.102901

1 引言

聚变反应堆是一种先进核能系统, 也是世界公认的可以永久解决核能可持续发展问题的有效途径之一. 因此, 针对聚变反应堆中存在的中子学、热工和材料等问题开展相关的研究是十分必要的. 目前, 世界范围内规模最大的聚变反应堆研究计划为国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) 计划, 其产生的中子能量为 14.1 MeV. FDS 团队在多年从事核能相关研究经验的基础上^[1-10], 研制了一种氘氘聚变反应中子发生器 HINEG (high intensity neutron generator), 其产生的中子与 ITER 产生的中子能量水平相同, 可用于模拟聚变堆中子环境, 进而可以开展聚变堆中子学及包层材料辐射损伤和活化分析等相关实验研究.

在氘氘中子发生器中, 氘靶系统是直接产生中子的关键部件, 需要承受由氘离子束带来的高热载. 目前, 国际上的氘靶系统主要有固定靶、旋转靶和振动靶三类^[11-13]. 其中, 固定靶主要用于靶面

热载相对较小的情况, 旋转靶和振动靶主要用于靶面热载较高的情况. 对于 FDS 团队研制的 HINEG 中子发生器, 当中子产额为 $10^{12} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级时, 对应的氘靶系统中靶片上需承受的热功率密度大约为 $3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$. 如何有效地将氘靶上的如此高的热载散去, 实现靶系统的冷却, 是该氘靶设计和研制的一项关键内容.

本文针对 $10^{12} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级中子发生器 HINEG 用氘靶系统, 对其创新方案和高热流密度强化传热方法等内容进行介绍, 并利用 Computational Fluid Dynamics (CFD) 方法对该氘靶系统在不同情况下的传热过程进行模拟和分析, 以考查该氘靶系统的传热特性.

2 氘靶原理与设计方案

对用于 $10^{12} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级中子发生器 HINEG 上的氘靶系统, 氘靶片基底材料为铬钴铜, 靶片上镀一层很薄的氘钛膜, 当氘离子束轰击靶片时, 钛膜中的氘与氘离子发生作用产生中子与 α 粒子, 此即

* 中国科学院科研装备研制项目 (批准号: Y2010009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gang.wang@fds.org.cn

氚靶的工作原理。

本文介绍的氚靶片上氚离子束的束斑直径为 1 cm, 束流功率强度为 2.4 kW, 因此束斑点处功率密度约为 $3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$. 该氚靶的技术难点在于: 一方面, 由于氚离子束功率绝大部分 (99% 以上) 会转化为氚靶片上的热沉积, 如果靶片固定不动且不加冷却, 则在如此高的功率密度下, 势必引起氚靶片局部温度上升和靶片材料的熔化; 另一方面, 实验结果表明, 当靶片表面的氚钛膜温度超过 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 膜中的氚会大量释放, 从而极大地降低旋转靶面的中子产额. 因此, 必须采取一定的技术手段将靶片表面的热载散掉, 实现靶片的有效冷却。

为了解决上述技术难点问题, 该氚靶系统采用旋转模式, 其设计方案和主要参数如表 1 所列. 该旋转氚靶系统的示意图参见图 1. 该系统的创新之处在于首次将旋转、直喷水冷却强化换热和磁流体密封等技术集成应用, 以解决 $10^{12} \text{ n}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级中子发生器的高热流密度散热问题。

表 1 旋转靶设计方案和参数

Table 1. Design and parameters of rotating target system.

参数	设计值
冷却方式	直喷水冷却
传动方式	带轮式传动
水动密封方式	机械密封
真空动密封方式	磁流体密封
真空腔室真空度/Pa	10^{-4}
靶面氚离子束直径/cm	1
靶面氚离子束功率/kW	2.4
靶片材料	铬铅铜
靶片直径/cm	20
靶片厚度/mm	1.5
靶片转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1000
氚钛膜厚度/m	5
氚钛膜氚钛原子比	1.6

该氚靶系统为解决上述技术难点所采用的关键技术如下。

1) 靶片旋转: 与固定靶相比, 旋转的氚靶系统可以使靶片上氚离子束轰击点实现循环冷却, 而不会被持续加热, 因此可以一定程度上降低靶片温度。

2) 直喷水冷却: 对靶片的强化换热采用直喷水冷却的方式, 冷却水以一定的流速从入水口流向靶片中心处, 通过靶片背面对靶片进行冷却后从出水口流出. 整个冷却水循环可借助水冷机实现。

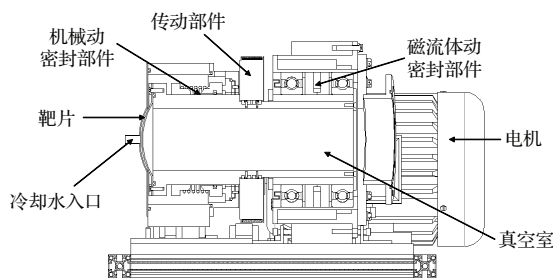


图 1 旋转氚靶示意图

Fig. 1. Schematic diagram of rotating tritium target system.

3 计算模型

为考查该旋转氚靶的传热特性, 本文首先对其建立了三维模型. 对该三维模型进行网格划分, 并进行网格敏感性分析, 综合考虑计算精度和经济性, 最终选取的网格数约为 30 万个 (见图 2)。



图 2 旋转靶系统计算模型网格划分

Fig. 2. Mesh model for rotating target system calculation.

本文利用 FLUENT 对旋转靶片的传热过程进行模拟, 湍流模型采用 $k-\epsilon$ 模型进行计算, 控制方程采用 Navier-Stokes 方程, 本文计算模拟的是测试条件下旋转靶的传热过程. 主要的边界条件设置为: 靶点处设置热通量边界条件, 热源的功率密度设置根据计算需要而定, 用来模拟氚离子束流对旋转靶的加热效果; 旋转靶的外壳设置的都是对流换热边界条件 (空气与外壳之间的对流换热), 靶片与冷却水之间的边界采用共轭热传输边界条件; 冷却水入口处设置为质量流量入口边界, 冷却水初始

值可根据要求进行设置, 若给定冷却水初始条件不变, 则旋转靶系统内部的水流速度值会随着靶片背面水层厚度增大而减小; 冷却水出口边界条件设置成压力出口边界, 压力大小为 1 atm; 在冷却水入口处设置定温边界条件.

对于旋转靶, 设置了一个旋转的速度场, 这个速度场能够影响旋转靶上的热量传输, 所造成的物理效果相当于靶片上的物质在不停的转动. 这样的旋转设置在能量方程中的对流项上起作用, 旋转速度场的大小是通过角速度来控制的.

4 计算结果与分析

4.1 水层厚度对靶冷却的影响

在热功率密度为 $3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、水流速为 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 、靶转速为 $1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下, 分别对水流区域厚度为 2, 5 和 10 mm 的三种水层进行计算, 三个参数对应的靶系统稳定运行时靶片表面温度分布如图 3 所示, 水层厚度对靶面最高温度的影响计算结果如图 4 所示.

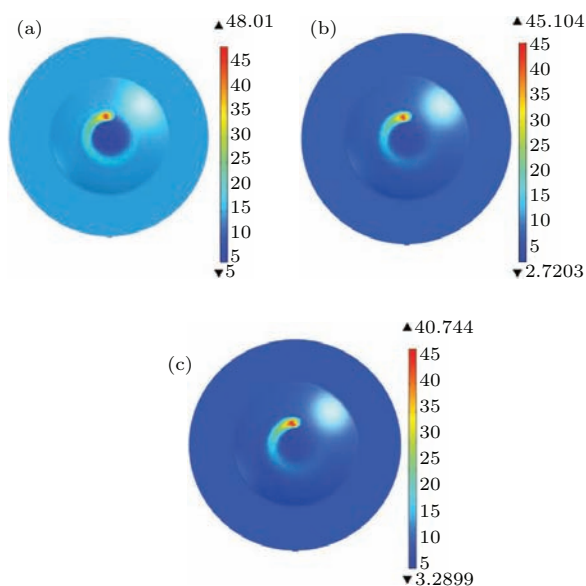


图 3 (网刊彩色) 不同水层厚度下靶片表面温度分布 (a) 2 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm

Fig. 3. (color online) Target temperature distributions under different water layer thicknesses: (a) 2 mm; (b) 5 mm; (c) 10 mm.

从图 4 可以看出, 2, 5 和 10 mm 对应的靶面最高温度分别为 $48 \text{ }^\circ\text{C}$, $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $40 \text{ }^\circ\text{C}$. 也就是说, 随着水层厚度的增加, 冷却系统对靶面的冷却效能也在增加, 但是这种效能的增加并不是很明显, 2 mm 厚的冷却水层厚度与 5 mm 和 10 mm 厚的冷却水

层厚度的冷却能力相差不大. 而根据中子学理论, 靶背面的水层厚度应该尽量薄, 以提高出射中子的品质. 所以本文接下来的计算和分析也是基于 2 mm 厚的冷却水厚度.

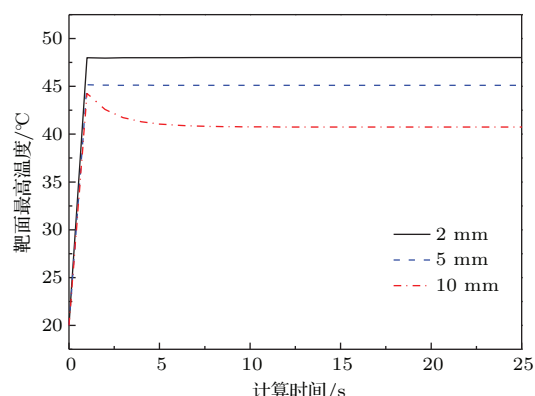


图 4 水层厚度对靶面最高温度的影响

Fig. 4. Effect on the target maximum temperature of water layer thickness.

4.2 水流速对靶冷却的影响

为了考查水流速对靶片冷却能力的影响, 本文计算了靶面热功率密度 $3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、水层厚 2 mm、靶转速 $1000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 情况下, 冷却水的入射流速分别为 5, 8 和 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 时的靶面最高温度, 计算结果参见图 5. 由图 5 可以看到, 入射水的流速越高, 冷却系统的冷却能力越强, 但所分析的三种不同水流速对应的冷却能力的增强并不是十分明显.

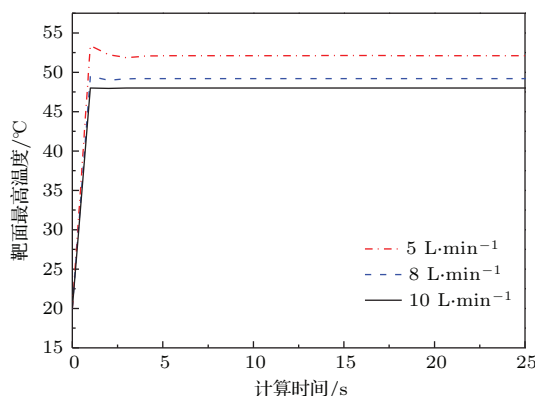


图 5 水流速对靶面最高温度的影响

Fig. 5. Effect on the target maximum temperature of water flow rate.

4.3 旋转速度对靶冷却的影响

图 6 为热功率密度 $3 \text{ kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、水层厚度 2 mm、水流速 $10 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下靶系统旋转速度对靶面最高温度的影响情况.

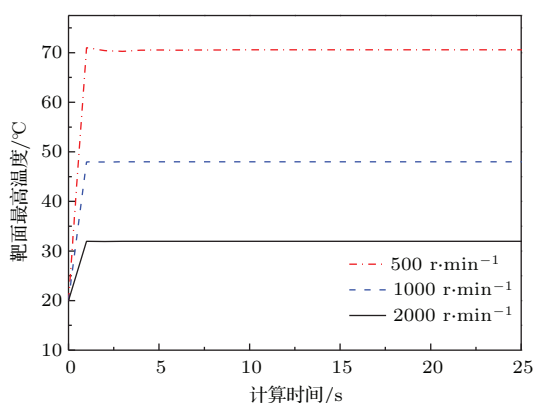


图6 旋转速度对靶面最高温度的影响

Fig. 6. Effect on the target maximum temperature of rotating speed.

从图6可以看出,不同的转速对靶面的最高温度有着较为明显的影响.主要原因可归结为两个方面:首先,靶面的转速越快,热量在靶面的分布就越均匀,避免了热量在靶面上的集中;其次,靶面的旋转极大地改变了冷却水的流场分布,快速的旋转增强了冷却水与靶面之间的换热效率.

4.4 不同热功率密度下靶面传热分析

在2 mm水层厚度、水流速10 L·min⁻¹、靶转速1000 r·min⁻¹的情况下,分别考查靶面热流密度为3, 12和24 kW·cm⁻²时靶面的传热情况,计算结果如图7所示.

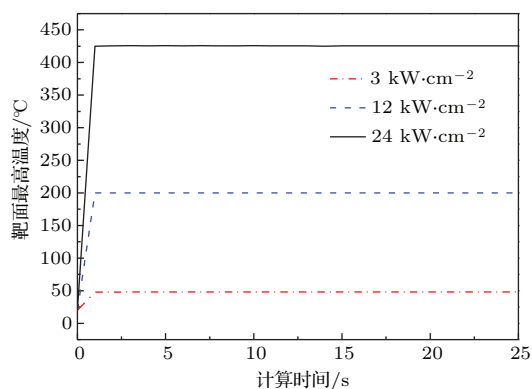


图7 不同热功率下靶面最高温度值

Fig. 7. Target maximum temperatures under different heat power densities.

从图7可以看到,当热流密度为12 kW·cm⁻²时,靶面的最高温度恰好与200 °C相当,而当功

率密度达到24 kW·cm⁻²时,靶面的最高温度已经超过了400 °C.根据本节的计算结果,在2 mm水层厚度、水流速10 L·min⁻¹、靶转速1000 r·min⁻¹转速的情况下,靶面所能承受的热载应控制在12 kW·cm⁻²以下,否则会发生氙的大量释放.

5 结 论

本文介绍了一种用于10¹² n·s⁻¹量级中子发生器HINEG的旋转靶系统,并对其创新方案和高热流密度强化传热方法进行了描述.借助CFD方法,对不同情况下该靶系统的传热过程进行了模拟,研究了不同水层厚度、水流速、旋转速度和热功率下靶面的传热过程,并对各过程中靶系统的传热特性进行了分析.分析结果表明,水层厚度越大、水流速越大、靶系统旋转速度越大,靶面的冷却效果越好,但水层厚度和水流速的变化对靶面传热影响较小.为满足靶对温度上限的需求,一定条件下靶面所承受的热功率密度不能超过某个限值(本文计算中得到的限值为12 kW·cm⁻²).

感谢FDS团队其他成员对本文工作提供的支持.

参考文献

- [1] Wu Y C, FDS Team 2009 *Fusion Engi. Des.* **84** 1987
- [2] Wu Y C, FDS Team 2007 *J. Nucl. Mater.* **367** 1410
- [3] Wu Y C, FDS Team 2006 *Fusion Engi. Des.* **81** 2713
- [4] Wu Y C, FDS Team 2007 *Nucl. Fusion* **47** 1533
- [5] Wu Y C, FDS Team 2007 *Fusion Engi. Des.* **82** 1893
- [6] Wu Y C, Qian J, Yu J 2002 *J. Nucl. Mater.* **307** 1629
- [7] Wu Y C, FDS Team 2009 *J. Nucl. Mater.* **386** 122
- [8] Qiu L, Wu Y, Xiao B, Xu Q, Huang Q, Wu B, Chen Y, Xu W, Chen Y, Liu X 2000 *Nucl. Fusion* **40** 629
- [9] Wu Y C, FDS Team 2008 *Fusion Engi. Des.* **83** 1683
- [10] Wu Y C, Xie Z, Fischer U 1999 *Nucl. Sci. Eng.* **133** 350
- [11] Ramey D W, Adair H L 1983 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **30** 1575
- [12] Logan C M, Heikkinen D W 1982 *Nucl. Instrum. Methods* **200** 105
- [13] Voronin G, Kovalchuk M, Svinin M, Solnyshkov A 1994 *Proceedings of EPAC 94* London, UK, June 27–July 1, 1994 p2678

Heat transfer analysis of rotating tritium target of deuterium-tritium fusion neutron generator*

Wang Gang[†] Yu Qian-Feng Wang Wen Song Gang Wu Yi-Can

(Key Laboratory of Neutronics and Radiation Safety, Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(Received 28 August 2014; revised manuscript received 29 December 2014)

Abstract

Fusion reactor is considered as one of the solutions for the sustaining development of nuclear energy. International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is the biggest fusion reactor research plan in the world. High-intensity D-T fusion neutron generator can generate 14 MeV neutrons, and it matches the neutrons generated in ITER and be competently used for imitating the neutron environment in nuclear fusion reactor, which is important for the relevant experimental researches of blanket materials of fusion reactors. It can also be used for validating the correctness and reliability of the simulations and analyses in fusion basic studies, and can guide the subsequent material improvement and innovation of calculation methodology. A rotating tritium target system for D-T fusion neutron generator with a neutron yield of 10^{12} n·s⁻¹, i.e., a high intensity D-T fusion neutron generator, is proposed in this paper and the design, main parameters, technical difficulties and heat transfer enhancement method are introduced. The key and innovative technology of this rotating target system is the integration of the sprayed water cooling, mechanical seal and magnetic fluid seal technologies, which focuses on the heat transfer of the high heat power density in the target system. The most important technical index is that the maximum temperature on the target should not be above 200 °C as the tritium ions run away heavily from the tritium target when the target temperature is bigger than 200 °C. To investigate the heat transfer characteristics of this rotating target system, the effects of water layer thickness, water flow rate and rotating speed on the heat transfer of this rotating target system are analyzed by computational fluid dynamics method. And the heat transfer processes of the target system under different heat power densities are also simulated and studied. The analysis results show that big water layer thickness, big water flow rate and high rotating speed are good for the heat transfer enhancement of the rotating target system, but the effects of the changes of the water layer thickness and water flow rate on the heat transfer process are both very small. Due to the design index, the heat power density on the target should be under a limit value, which is about 12 kW·cm⁻² in the calculation results of this paper.

Keywords: deuterium-tritium fusion, neutron generator, rotating target, heat transfer characteristics

PACS: 29.25.Dz, 44.90.+c

DOI: 10.7498/aps.64.102901

* Project supported by the Scientific Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences (Grant No. Y2010009).

† Corresponding author. E-mail: gang.wang@fds.org.cn