

中国氦冷固态增殖剂产氦包层设计研发进展

王晓宇¹、赵奉超¹、武兴华¹、叶兴福¹、罗德礼²、雷明准⁴、刘素梅²、陈红丽³、曹启祥¹、巩保平¹、周冰¹、王芬¹、张鸿翔¹、廖洪彬¹与氦冷固态增殖剂包层团队

¹中核集团核工业西南物理研究院，成都 610225

²中国工程物理研究院，绵阳，621000

³中国科技大学，合肥，230026

⁴中国科学院等离子体物理研究所，合肥，230031

Email: wangxy@swip.ac.cn

摘要：产氦包层作为聚变反应堆的核心部件之一，是聚变堆实现氦自持和发电所不可或缺的，但在工程化应用前，产氦包层仍面临着许多技术挑战，因此，根据中国磁约束核聚变能发展路线，氦冷固态增殖剂产氦包层也按照不同阶段的目标开展设计和研发工作。

中国已经和 ITER 国际组织签署了中国氦冷固态增殖剂实验包层协议，承诺制造氦冷固态增殖剂实验包层及其辅助系统并在 ITER 装置上测试，从而验证排热、氦提取、系统集成和安全等产氦包层关键技术，并为中国聚变工程实验堆（CFETR）产氦包层的发展提供经验与实验数据。氦冷固态增殖剂实验包层系统的概念设计已经在 2015 年获得 ITER 国际组织的批准，在此后的初步设计阶段中，基于材料和制造工艺的研发对实验包层模块的设计进行了优化和结构完整性的模拟与实验，以确保制造可行性和结构可靠性，实验包层模块所使用的低活化钢已经实现了 5 吨级钢锭的生产规模，开发了硅酸锂氦增殖剂和铍中子倍增剂的生产工艺，并通过半原型模块的研制研制了制造工艺，辅助系统设计也根据工艺流程调整、系统性能和 ITER 运行条件下的结构完整性进行了优化，并搭建了数个测试平台用于部件和工艺的测试，以获得测试和运行数据。

与此同时，针对中国磁约束核聚变能发展路线中的下一个装置，中国已经开展中国聚变工程实验堆的初步工程设计和预研。作为 CFETR 的关键部件，氦冷固态增殖剂产氦包层也得到国家支持开展设计研发和测试平台的搭建，其主要设计特征和材料选择与 ITER 氦冷固态增殖剂实验包层类似，通过与其他系统的反复迭代，已经确定了初步的包层布置方案，目前在考虑氦增殖率和屏蔽性能的基础上着力进行氦冷固态包层详细设计优化。产氦包层与真空室的集成设计、与远程遥控的兼容性评估已经初步完成。其制造工艺的研发主要集中于第一壁钨材料钨与低活化钢 CLF-1 的连接技术和第一壁的制造工艺，此外，球床测试设备和氦冷试验回路等测试设施也已经开展设计并将在今后两年内开建。这些工作将促进产氦包层在材料、制造、氦处理技维护、系统集成和安全等方面技术的发展，成为 ITER 产氦实验包层和未来聚变示范堆产氦包层之间的技术桥梁。

关键词：氦冷固态增殖剂产氦包层；ITER；CFETR；设计研发

参考文献（文献中文五号宋体，英文和数字为 Times New Roman 五号字）

- [1] X.Y. Wang, K.M. Feng, Y.J. Chen, et al. Current design and R&D progress of the Chinese helium cooled ceramic breeder test blanket system, *Nucl. Fusion* 59 (2019) 076019
- [2] Feng K, Wang X, Feng Y, et al. Current progress of Chinese HCCB TBM program[J]. *Fusion Engineering & Design*, 2016, 109-111:729-735
- [3] Liao H B, Wang X Y, Yang G P, et al. Recent progress of R&D activities on reduced activation ferritic/martensitic steel (CLF-1)[J]. *Fusion Energy and Design*, 2019,147

国家重点研发计划：磁约束核聚变能发展研究专项项目（NO. 2017YFE0300600、2017YFE0300503）