

## 中国磁约束核聚变中性束研究现状与展望

雷光玖<sup>1</sup>, 胡纯栋<sup>2</sup>, 曹建勇<sup>1</sup>, 王友年<sup>4</sup>, 刘东平<sup>4</sup>, 邹桂清<sup>1</sup>, 谢亚红<sup>2</sup>, 谢远来<sup>2</sup>, 高飞<sup>4</sup>, 张明<sup>3</sup>, 陈德智<sup>3</sup>, 张贤明<sup>1</sup>, 耿少飞<sup>1</sup>, 魏会领<sup>1</sup>, 卢波<sup>1</sup>, 严龙文<sup>1</sup>, 周才品<sup>1</sup>, 许敏<sup>1</sup>, 段旭如<sup>1</sup>, 刘永<sup>1</sup>, 核工业西南物理研究院中性束研究组, 等离子体物理所中性束研究组, 华中科技大学负离子源及高压电源研究组, 大连理工大学等离子体物理研究组

<sup>1</sup> 中核集团核工业西南物理研究院, 成都 610225

<sup>2</sup> 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230027

<sup>3</sup> 华中科技大学, 武汉 430074

<sup>4</sup> 大连理工大学, 大连 116024

Email: [gjlei@swip.ac.cn](mailto:gjlei@swip.ac.cn)

**摘要:** 中国磁约束核聚变中性束注入器 (NBI) 研究始于 1970 年代后期, 主要在核工业西南物理研究院 (SWIP) 和中国科学院等离子体物理研究所 (ASIPP) 开展。SWIP 先后研制了 7 cm 双-潘宁放电离子源、7 cm×35 cm 无磁场多灯丝离子源及 8.5 cm 桶式离子源, 并研制了 80 kW 和 150 kW NBI 系统; 1990 年代研制成功的 NBI 在 HL-1M 上实现了中性束注入加热; HL-2A 上的第一条中性束在 2008 年度物理实验中成功注入功率 0.75 MW, 次年在国内首次实现了高约束模式运行, 在 HL-2A 上运行的两条束线的总加热功率 4MW; 正在安装的 HL-2M 的中性束加热系统由 3 条束线组成, 总加热功率 15MW, 第一条束线在 2017 已经通过验收。ASIPP 早期研制了 5 cm、7 cm、15 cm 的双潘宁放电离子源, 目前在 EAST 上运行的 2 条大功率长脉冲中性束系统, 总加热功率 8MW。

为了满足聚变堆高能量、长寿命及稳定运行的中性束加热要求, 2006 年 SWIP 开始了大功率射频离子源研究, 2015 年射频离子源离子束引出参数达到 32keV/12.5A/0.1s, 其中 80 kW 的全固态大功率射频系统等达到国际领先水平; 2018 年, ASIPP 在耦合射频功率 35 kW 的条件下, 实现了长达 1000 s 的射频等离子体放电; SWIP 正在运行的桶式负离子源已经成功馈入铯蒸汽, 目前引出负离子流强 0.75A。

中国聚变实验堆 (CFETR) 中性束加热系统由 2 条束线组成, 注入参数设计为 40 MW/1 MeV/4hs。“CFETR 负离子源中性束系统验证样机研制”项目在 2017 年进入实施, 项目联合了 SWIP、ASIPP、华中科技大学、大连理工大学、大连民族大学、西南交通大学等单位, 并开展了广泛的国际合作。明年将实现单驱动射频负离子源放电。

中国磁约束核聚变中性束注入器研究走过了近 50 年历程, 在 HL-1M、HL-2A、HL-2M、EAST 装置上实现了大功率中性束加热, 且在 HL-2A 和 EAST 两个装置上都实现了中性束加热条件下的等离子体高约束模式放电。为实现 CFETR NBI 目标, 联合国内单位, 同时广泛开展国际合作, 计划在 2022 年完成 CFETR N-NBI 第一阶段的研究目标, 并同步开展涉及射频负离子源技术等若干中性束物理和工程技术问题研究, 为下一阶段研究奠定重要基础。

**关键词:** 中性束; 桶式离子源; 射频离子源; 负离子源; 射频负离子源

**国家重点研发计划项目:** 国家重点研发计划项目 (2017YFE0300100)

**基金项目:** 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 11320101005)