

# 东方超环 EAST 千秒级稳态高参数等离子体关键技术

(科技攻关奖)

(中国科学院合肥物质科学研究院)

## 1、 推荐意见 (不超过 300 字)

该项目瞄准磁约束聚变稳态高参数等离子体国际前沿，通过国家重大科技基础设施 EAST 性能提升，攻克了高功率多波段等离子体加热技术瓶颈，建成了等离子体协同加热系统，创建了新型馈电方案和设计基准，实现了超导磁体万安培级电流长时间稳定安全运行，突破了长时间尺度下热与粒子高精度诊断及精准控制，国际首次揭示湍动电流和多尺度稳态自组织维持机制，发现了新的高能量约束和自组织模式超级 I 模，创造了“403 秒高约束模”和“1056 秒高参数等离子体”等高约束模式运行世界纪录，对深度参与国际热核聚变实验堆 ITER 计划和我国自主建设聚变工程堆具有重要意义。我单位推荐该项目为中国科学院杰出科技成就奖（科技攻关奖）候选者。

## 2、 主要发明专利列表

序号	发明专利名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	发明人	发明专利有效状态
----	--------	------------	-----	------	-----	----------

1	低射频鞘、高灵活性多元阵射频波加热天线	中国	ZL201910432381.3	2021-05-11	宋云涛; 杨庆喜; 王永胜; 陈肇玺; 徐皓; 赵燕平	有效专利
2	一种长脉冲回旋管功率控制方法	中国	ZL202010240000.4	2021-08-03	徐伟业; 徐昂东; 刘甫坤; 侯永忠; 王建; 何武松; 张涛	有效专利
3	一种降低加热天线射频鞘的电流补偿装置	中国	ZL202110535788.6	2022-05-10	宋云涛; 李家豪; 杨庆喜; 陈肇玺; 徐皓; 陈仕琳	有效专利
4	Insulation treatment method for helium inlet pipe of superconducting magnet	美国	US10964466B2	2021-03-30	Yutao Song; Guang Shen; Kun Lu; Bing Hu; Xiaowu Yu; Jing Wei	有效专利
5	Cylindrical Joint for Connecting Sub-Cables of Superconducting Busbar	美国	US10985476B2	2021-04-20	Kun Lu; Yuntao Song; Xiongyi Huang; Xinjie Wen; Chen Liu	有效专利
6	大電流高温超電導電流リード用のヘリウム冷却型高温超電導部材	日本	特許第6860754号	2021-03-30	宋云涛; 冉庆翔; 陆坤; 刘承连; 丁开忠; 刘辰; 黄雄一	有效专利
7	千秒長パルスプラズマ放電を満たした協調燃料供給システム及	日本	特許第7515038号	2024-07-03	宋云涛; 胡建生; 左桂忠; 曹斌; 吴金华; 侯吉磊; 元京升; 陈跃; 余耀伟; 黄明; 龚先祖	有效专利

	び方法					
8	一种满足千秒量级等离子体的粒子排除结构及方法	中国	ZL202310461978.7	2023-08-04	左桂忠; 胡建生; 庄会东; 黄明; 陈鑫鑫; 訾鹏飞; 曹斌; 龚先祖; 宋云涛	有效专利
9	一种二极管激光器调谐实现主动光谱诊断采集及数据分析系统	中国	ZL201911058710.9	2023-04-07	叶孜崇; 张炜; 徐国盛	有效专利
10	一种托卡马克磁场最外闭合磁面的建模方法	中国	ZL202211458248.3	2023-03-14	万晨光; 刘晓娟; 于治; 李建刚	有效专利

### 3、其他知识产权和标准等列表

序号	类型	名称	著录信息	全部完成人
1	论文专著	Realization of thousand-second improved confinement plasma with Super I-mode in Tokamak EAST	2023, Vol. 9, No.1, eabq5273	Song Yuntao (通讯), Zou Xiaolan (通讯), Gong Xianzu (通讯), Becoulet Alain, Buttery Richard, Bonoli Paul, Hoang Tuong, Maingi Rajesh, Qian Jinping, Zhong Xiaoming, Liu Adi, Li Erzhong, Ding Rui, Huang Juan, Zang Qing, Liu Haiqing, Wang Liang, Zhang Ling, Li Guoqiang, Sun Youwen, Garofalo Andrea, Osborne Tom, Leonard Tony, Baek Seung Gyou, Wallace Greg, Xu Liqing, Zhang Bin, Wang Shouxin, Chu Yuqi, Zhang Tao, Duan Yanmin, Lian Hui, Zhang Xuexi, Jin Yifei, Zeng Long, Lyu Bo, Xiao Binjia, Huang Yao, Wang Yong, Shen

				Biao, Xiang Nong, Wu Yu, Wu Jiefeng, Wang Xiaojie, Ding Bojiang, Li Miaohui, Zhang Xinjun, Qin Chengming, Xi Weibin, Zhang Jian, Huang Liansheng, Yao Damao, Hu Yanlan, Zuo Guizhong, Yuan Qiping, Zhou Zhiwei, Wang Mao, Xu Handong, Xie Yahong, Wang Zhengchu, Chen Junling, Xu Guosheng, Hu Jiansheng, Lu Kun, Liu Fukun, Wu Xinchao, Wan Baonian, Li Jiangan, EAST Team
2	论文专著	Experimental Evidence of Intrinsic Current Generation by Turbulence in Stationary Tokamak Plasma	2022, 128(8), 085003,	Erzhong Li, X. L. Zou, L. Q. Xu (通讯), Y. Q. Chu, X. Feng, H. Lian, H. Q. Liu, A. D. Liu, M. K. Han, J. Q. Dong, H. H. Wang, J. W. Liu, Q. Zang, S. X. Wang, T. F. Zhou, Y. H. Huang, L. Q. Hu, C. Zhou, H. X. Qu, Y. Chen, S. Y. Lin, B. Zhang, J. P. Qian, J. S. Hu, G. S. Xu, J. L. Chen, K. Lu, F. K. Liu, Y. T. Song, J. G. Li, and X. Z. Gong (通讯), EAST Team
3	标准	核聚变装置安全 RAMI 分析一般原则	EJ/T 20280-2021	覃世军、宋云涛、陆坤、郑金星、黄素贞、卫靖、汪青峰、武松涛、陈先锋、曹金、王莉
4	标准	托卡马克聚变堆遥操作部件兼容性设计与评估技术指南 第1部分:设计技术指南	GB/T 39225.1-2020	宋云涛、程勇、陆坤、李阳、赵文龙、杨洋、潘洪涛、黄素贞、方秀芬
5	标准	Testing method for electrical performance of composite insulation breaks for superconducting magnet system	U/PSNS-023-2022	吴诚、朱银锋、沈默、宋云涛、潘皖江、陆坤、郑金星

#### 4、成员贡献情况

排序	姓名	工作单位	主要贡献
1	宋云涛	中国科学院合肥物质科学研究院	项目的主要负责人，带领团队突破了多波协同稳态高功率加热关键技术，主持开展 EAST 装置主机安全性维护及新型高温超导电流引线及多型磁体失超探测方法，使 EAST 具备世界领先的稳态高参数等离子体运行能力。
2	龚先祖	中国科学院合肥物质科学研究院	千秒级实验主要完成人，主要学术思想的提出者和实验组织者。提出电子回旋与低杂波加热与电流驱动协调方案，实现了高功率注入下的完全非感应运行模式，解决了长脉冲等离子体获得过程中再循环及热流控制难题。
3	胡建生	中国科学院合肥物质科学研究院	本项目主要组织者，提出锂化壁处理方法，率先开展锂粉注入控制等离子体不稳定性，发展超声分子束、弹丸注入等先进加料技术，提升真空系统性能，解决了长脉冲等离子体获得过程中杂质、粒子再循环及热流控制难题。
4	陆坤	中国科学院合肥物质科学研究院	组织 EAST 重大性能提升的工程实施，全面升级 EAST 内部部件，提升 EAST 下偏滤器排热能力达到 10 兆瓦每平方米，提升加热系统耦合功率和系统可靠性，为 EAST 千秒级稳态高参数运行提供坚实的工程保障。
5	徐国盛	中国科学院合肥物质科学研究院	主持 EAST 升级改造物理设计，发展了小或无边界局域模高性能等离子体运行模式，提出了利用封闭结构俘获再循环中性粒子的偏滤器物理新方案，主持设计完成新下偏滤器，显著提升了

			EAST 热流控制等高参数运行能力。
6	刘甫坤	中国科学院合肥物质科学研究院	主持完成 EAST 低杂波加热系统建设；主持完成 EAST 电子回旋波系统建设。这两大波系统建成并稳定运行，为 EAST 装置开展高水平物理实验研究奠定重要基础条件。
7	钱金平	中国科学院合肥物质科学研究院	千秒级实验主要完成人，实验主要执行者。基于加热与电流驱动、等离子体参数优化调控，寻找完全非感应高约束等离子体运行条件，解决千秒级等离子体位型控制误差问题，对 EAST 千秒高参数等离子体做出重要贡献。
8	陈俊凌	中国科学院合肥物质科学研究院	主持研发了适用于托卡马克面对等离子体的 SiC 复合涂层掺杂石墨材料，具有优异的抗等离子体溅射和耐热负荷性能，成功应用于 EAST 装置，保障了 EAST 千秒运行过程中杂质的有效控制及高热负荷的实时移除。
9	万宝年	中国科学院合肥物质科学研究院	主持 EAST 装置诊断、波加热/电流驱动等技术发展，解决了超导托卡马克等离子体平衡/稳定性、低杂波电流驱动等波耦合、驱动/加热效率中的一些关键性问题，大幅提高了装置的稳态长脉冲运行能力。
10	李建刚	中国科学院合肥物质科学研究院	主持高性能稳态托卡马克实验技术发展，攻克了一系列技术瓶颈，系统建成多项具有国际先进水平的 EAST 工程实验系统，在等离子体加热、偏滤器物理与工程、等离子体与材料相互作用等方面做出重要贡献。

说明：公示内容须与推荐书相关部分一致。