

安徽省科学技术奖提名项目公示内容

(自然科学奖, 2025 年度)

一、项目名称

聚变装置钨铜面对等离子体部件原位熔化机理及影响研究

二、提名者及提名意见

提名者: 中国科学院合肥物质科学研究院

提名意见: (600 字以内)

该项目面向聚变能源领域关键基础科学问题, 依托 EAST 全超导托卡马克装置, 系统开展主动水冷钨铜面对等离子体部件原位熔化机理及其影响的基础研究, 取得多项具有国际影响力的原创性成果。揭示物理与工程多因素耦合驱动下钨铜部件原位熔化机理; 阐明熔滴输运动力学行为及其对托卡马克等离子体运行的影响规律; 建立部件抗熔化构型热-结构分析方法, 提出倒角构型优化原则、装配错配阈值定量控制准则等熔化风险防控的科学判据。系列成果发表于 *Nuclear Fusion* 等聚变领域国际权威期刊, 被 ITER 组织等国内外多家顶尖聚变研究机构及团队广泛引用。相关科学认识支撑 EAST 装置偏滤器与限制器部件迭代升级, 助力 EAST 持续取得长脉冲高参数运行世界纪录, 也为 ITER、BEST 等下一代聚变装置面对等离子体部件设计优化提供重要的大装置实验与理论依据。项目填报材料真实有效, 主要完成人排序和贡献客观准确, 知识产权与成果权属无争议, 符合安徽省自然科学奖提名条件。同意提名该项目作为 2025 年安徽省自然科学奖候选项目。

三、项目简介

未来国际热核聚变实验装置 ITER 和中国紧凑型聚变能实验装置 BEST 等大科学装置高参数稳态运行下, 钨铜面对等离子体部件面临较高的熔化风险, 是影响装置安全和实验发展的关键瓶颈问题。本项目依托 EAST 全超导托卡马克装置, 在国家自然科学基金项目[项目编号: 11405209, 11775260, U21A20439]的持续资助下, 围绕长脉冲高参数运行条件下钨铜面对等离子体部件的原位熔化机理和影响开展系统的实验与理论基础研究。重要创新发现如下:

（1）发现稳态工况下，穿管型部件熔化主要由装配错位诱发的前缘热聚集效应主导，平板型部件熔化源于钨-铜界面循环热疲劳引发的渐进开裂与传热劣化；同时证实快离子损失、低杂波驱动快电子造成的局部高热负荷可诱发局部熔化，而逃逸电子形成的超强瞬态热载荷仅导致部件表层熔融，进一步完善了钨铜部件原位熔化的多源驱动理论体系；

（2）明确 $j \times B$ 电磁力是熔化层运动的核心驱动力，重力与等离子体冲击压力为次要调控因素，而熔滴在等离子体的迁移受重力影响较大，对等离子体的影响也有所差异，发现极向安装位置对熔滴诱发等离子体破裂的影响规律；同时，发现穿管部件尖缘熔化会形成自倒角结构实现短时抗熔自适应调控，而平板部件界面热疲劳渐进开裂损伤失效表现为不可逆持续恶化；

（3）构建钨部件抗熔化构型热分析模型，评估双倒角、鱼鳞边、椭圆边缘等多种构型及尺寸的热缓解效果，发现早期采纳的倒角构型存在装配错配和热流耐受度不足的固有短板，明确构型结构和尺寸优化也存在固有理论上限，提出“构型尺寸优化+装配错配阈值管控”协同防控科学依据。

项目主要科学成果发表于聚变领域顶级期刊 Nuclear Fusion，多篇代表性论文被 ITER 组织等国内外多家顶尖聚变研究机构及团队广泛引用。相关科学认识支撑 EAST 装置偏滤器与限制器部件迭代升级，助力 EAST 持续取得长脉冲高参数运行世界纪录，也为 ITER、BEST 等下一代聚变装置面对等离子体部件设计优化提供重要的大装置实验与理论依据，显著提升我国在聚变等离子体与壁相互作用研究领域的国际学术影响力。

四、代表性论文专著目录

序号	论文（专著）名称/刊名/作者	年卷页码 （xx 年 x 卷 x 页）	发表时间年月日	通讯作者（含共同）	第一作者（含共同）	国内作者	论文署名单位是否包含国外单位
1	Characterization of the in situ leading-edge-induced melting on the ITER-like tungsten divertor in EAST /Nuclear Fusion /Dahuan Zhu, Changjun Li, Rui Ding, Baoguo Wang, Junling Chen, Binfu Gao, Yongqi Gu, Xianzu Gong and EAST Team	2020 年 60 卷 016036 页	2019 年 12 月 11 日	Rui Ding	Dahuan Zhu	朱大焕，李长君，丁锐，王保国，陈俊凌，高彬富，顾永奇，龚先祖	否

2	In situ melting phenomena on W plasma-facing components for lower divertor during long-pulse plasma operations in EAST /Nuclear Fusion /D. Zhu, Z. Guo, C. Xuan, B. Yu, C. Li, B. Gao, R. Ding, R. Yan, Y. Wang, C. He, D. Yao, L. Cao, P. Zi, L. Han, B. Wang, W. Fu, Y. Li, J. Chen and the EAST Team	2023 年 63 卷 036022 页	2023 年 2 月 10 日	C. Li, R. Ding	D. Zhu	朱大焕, 郭宗晓, 宣传南, 于白雪, 李长君, 高彬富, 丁锐, 鄢容, 汪洋, 何春宇, 姚达毛, 曹磊, 訾鹏飞, 韩乐, 王保国, 傅文雪, 李义, 陈俊凌	否
3	In situ leading-edge-induced damages of melting and cracking W/Cu monoblocks as divertor target during long-term operations in EAST /Nuclear Fusion / Dahuan Zhu, Changjun Li, Binfu Gao, Rui Ding, Baoguo Wang, Zongxiao Guo, Chuannan Xuan, Baixue Yu, Yang Lei, Junling Chen and the EAST Team	2022 年 62 卷 056004 页	2022 年 3 月 15 日	Changjun Li, Rui Ding	Dahuan Zhu	朱大焕, 李长君, 高彬富, 丁锐, 王保国, 郭宗晓, 宣传南, 于白雪, 雷阳, 陈俊凌	否
4	Characterization on the melting failure of CuCrZr cooling tube of W/Cu monoblocks during plasma operations in EAST /Nuclear Materials and Energy /Changjun Li, Dahuan Zhu, Rui Ding, Baoguo Wang, Junling Chen, Binfu Gao, Yang Lei	2020 年 第 25 卷 100847 页	2020 年 12 月 17 日	Dahuan Zhu	Changjun Li	李长君, 朱大焕, 丁锐, 王保国, 陈俊凌, 高彬富, 雷阳	否

5	Plasma-facing components damage and its effects on plasma performance in EAST tokamak /Fusion Engineering and Design /Binfu Gao, Rui Ding, Hai Xie, Long Zeng, Ling Zhang, Baoguo Wang, Changjun Li, Dahuan Zhu, Rong Yan, Junling Chen	2020 年 156 卷 111616 页	2020 年 3 月 9 日	Rui Ding	Binfu Gao	高彬富， 丁锐，谢海，曾龙，张凌，王保国，李长君，朱大焕，鄢容，陈俊凌	否
6	Thermal analysis on the EAST tungsten plasma facing components with shaping structure counteracting the misalignment issues /Plasma Science and Technology /Baoguo Wang, Dahuan Zhu, Rui Ding, Junling Chen	2017 年 19 卷 025603 页	2017 年 1 月 3 日	Dahuan Zhu	Baoguo Wang	王保国， 朱大焕， 丁锐，陈俊凌	否

五、主要完成人（按完成人顺序排列）

朱大焕，王保国，高彬富，郭宗晓，宣传南

六、主要完成单位（按完成单位顺序排列）

中国科学院合肥物质科学研究院

七、论证专家

姓名	工作单位	职称	专业领域
潘必才	中国科学技术大学	教授	核材料
孙飞	合肥工业大学	教授	聚变堆材料部件
罗来马	合肥工业大学	教授	聚变堆材料部件
黄娟	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	磁约束等离子体物理
韩效锋	中国科学院合肥物质科学研究院	研究员	磁约束等离子体物理

