

## 附件 1

# “国家磁约束核聚变能发展研究专项” 2025 年度公开项目申报指南

核聚变能具有资源丰富和环境友好的优点，被视为人类社会未来的理想能源，是最有希望彻底解决能源问题的根本出路之一，对于我国经济社会的可持续发展具有重要的战略意义。

本专项总体目标是：在“十四五”期间，以未来建堆所涉及的国际前沿科学和技术目标为努力方向，加强国内与“国际热核聚变实验堆”（简称“ITER”）计划相关的核聚变能技术研究和创新，发展核聚变能开发和应用的关键技术，加快国内核聚变发展，开展高水平的科学研究；以参加 ITER 计划为契机，全面消化吸收 ITER 关键技术；依托我国的“东方超环”（EAST）、“中国环流三号”（HL-3）托卡马克装置开展与聚变堆物理相关的验证性实验，推动我国磁约束核聚变能相关标准体系建设，加大核聚变技术在国民经济中的应用，大力提升我国核聚变能发展研究的自主创新能力，培养并形成一支稳定的高水平核聚变研发队伍，为 ITER 和我国聚变堆建设奠定科学基础。

2025 年度项目申报指南以 ITER 和聚变堆未来科学研究为目标，加快国内核聚变发展，重点支持核聚变基础研究、未来聚变堆

关键技术及部件研发、ITER 关键物理研究和青年人才培养等工作，拟支持 20 个项目，拟安排国拨经费 3.73 亿元。其中，持续推动我国磁约束等核聚变能基础与应用研究，拟支持 15 个项目，拟安排国拨经费概算 3.25 亿元。同时，指南方向 16~20 拟支持 39 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 4800 万元：指南方向 16~19，每个项目约 150 万元；指南方向 20，每个项目约 80 万元。

指南方向 1~15 项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容和考核指标。同一指南方向下，原则上只支持 1 个立项项目，仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时，可同时支持 2 个立项项目，并建立动态调整机制，根据中期评估结果，再择优继续支持。项目实施周期不超过 5 年。项目下设课题数不超过 4 个，每个项目参与单位总数不超过 6 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人，项目负责人可担任其中 1 个课题的负责人。

指南方向 16~20 为青年科学家项目，支持青年科研人员承担国家科研任务。项目实施周期一般为 5 年。青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名负责人，对于指南方向 16~19 的项目负责人年龄应为 1985 年 1 月 1 日以后出生；对于指南方向 20 的项目负责人年龄应为 1990 年 1 月 1 日以后出生。原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

本专项 2025 年度公开项目申报指南如下。

## 1. 等离子体动力学平衡信息的准实时分析和快速预测研究

研究内容：瞄准未来聚变堆诊断数据自动、自洽、快速动力学平衡分析和运行预测的需求，依托现有托卡马克装置，研究和开展诊断数据的模拟、甄别、清洗和快速传输以及分析处理方法。针对等离子体动力学平衡参数完善相关诊断，发展物理模型和快速算法，实现长脉冲等离子体放电实验数据的批量快速分析和传输，自洽地给出放电全空间、全过程的等离子体温度、密度、电流密度剖面等关键动理学信息，发展动力学平衡及关键动理学信息的快速预测模型。在此基础上，建立诊断数据的分析框架和共享平台，实现炮间动力学平衡分析和运行模拟预测，支撑物理实验的高效运行和数据共享。

考核指标：建成托卡马克诊断数据准实时分析集成平台：（1）实现炮间自洽的自动等离子体动理学平衡重建，时间步长不大于 100 ms，提供等离子体温度、密度、电流密度等关键参数的径向剖面分布；（2）针对长脉冲等离子体放电实验，验证和演示放电准实时数据处理、传输和动力学平衡分析，时间步长不大于 100 ms，全空间、全过程平衡重建时间小于 20 min，模拟预测时间小于 20 min。

关键词：诊断数据、数据共享、动力学平衡、动理学剖面、平衡自动快速重建、模拟预测

## 2. 聚变等离子体中燃料注入与芯部粒子控制技术研究

研究内容：聚变堆燃烧等离子体的燃料控制问题至关重要且亟待解决，与装置运行安全紧密相连，并受氚盘存量辐射安全规定约束。在大电流、高密度等高参数条件下，多种燃料的加料、芯部比例测量及其同位素输运研究尤为关键。本方向将聚焦于优化超声分子束加料技术，实现芯部不同加料比例的测量及稳定控制，开展高参数下的同位素效应研究，理解燃料的迁移和输运过程，实现燃料的高效利用与循环，确保聚变堆运行的安全性和经济性。

考核指标：（1）研发高加料效率的超声分子束加料技术，束流速度达 1500 m/s 以上，频率 100 Hz，单个脉冲注入粒子不低于  $10^{20}$ ；（2）在等离子体电流大于 1.5 MA、时间尺度大于 2 倍能量约束时间的条件下，实现加料后等离子体氢同位素比例 20% - 60% 的稳定控制；（3）在离子温度大于 10 keV、时间尺度大于 2 倍粒子约束时间、燃料种类  $\geq 2$  的条件下，实现误差  $\leq 10\%$ 、时间分辨优于 100 ms 的同位素比测量；获得不同燃料组分迁移率。

关键词：燃料注入、超声分子束、芯部粒子控制、同位素测量、能量输运时间、粒子约束时间

### 3. 兼容托卡马克高参数运行的先进偏滤器物理实验研究

研究内容：针对未来聚变堆所面临的偏滤器高热负荷控制和芯部高参数运行兼容性问题，开展托卡马克大电流高参数等离子体条件下的先进偏滤器位形物理实验研究。研究先进偏滤器位形

下的芯部和边缘等离子体相互作用机理，开发满足偏滤器热负荷和芯部高参数要求的先进偏滤器位形优化方案，探索相应运行模式，并与常规偏滤器位形脱靶运行进行比较，拓展人工智能应用，发展兼容托卡马克高参数运行的偏滤器热流和粒子流实时控制方法，为未来聚变堆运行提供科学技术支撑。

考核指标：（1）等离子体电流大于 1 MA 的先进偏滤器位形放电，偏滤器靶板热负荷峰值相较常规偏滤器位形下的最高峰值热流  $5 \text{ MW/m}^2$  降低 50% 以上，维持时间大于 5 倍能量约束时间；（2）在等离子体电流大于 1 MA 的先进偏滤器位形下聚变三乘积大于  $3 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \cdot \text{keV} \cdot \text{s}$ ，等离子体归一化比压  $\beta_N > 2$ ，维持时间超过能量约束时间。

关键词：先进偏滤器、常规偏滤器、高参数运行、热负荷控制、比压、能量约束时间

#### 4. 面向聚变堆的全局粒子平衡实验和模拟研究

研究内容：依托现有托卡马克装置，结合高效燃料粒子加料技术发展和杂质注入需求，研究不同壁条件和多种工况下燃料、氦、杂质粒子输运和再循环物理机制及其滞留行为；利用氦气注入和高能量氦粒子注入开展相关实验和模拟研究，建立全局的粒子平衡模型，可分析和预测未来聚变堆氦灰排除和氦燃烧效率，探索提升芯部燃料离子份额和燃料注入利用率的方法，研究不同运行工况下壁滞留和再循环对等离子体约束性能的影响。在 ITER

国际托卡马克物理活动框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和参与约束与输运专题组的多装置国际联合研究，促进成果在 ITER 科学研究中的应用。

考核指标：（1）自主研发粒子平衡测量和分析系统，累积测量时间百秒统计误差小于 20%；（2）建立全局粒子平衡模型，具备分析和预测未来聚变堆氦灰排除和氦燃烧效率的能力；（3）通过粒子平衡的有效控制，在数十秒量级的时间尺度上验证模型并实现燃料离子浓度份额  $> 70\%$ ；（4）在约束与输运专题组的联合实验研究中，至少有一项由我国科研人员或装置主导的国际托卡马克联合实验研究；联合实验研究参与度达到 50%；每年在专题组会议报告不少于两次。

关键词：粒子平衡、加料、氦灰排除、燃烧效率、再循环、国际托卡马克物理活动

### 5. 聚变堆全钨第一壁条件下台基区不稳定性和输运物理研究

研究内容：针对全钨第一壁，依托现有托卡马克装置，发展具有普适性的台基物理模型，研究钨壁条件下台基区演化规律，分析台基区径向位移、台基区宽度、密度与温度台基偏移等对整体约束性能的影响，并与碳壁条件下台基区演化规律相比较；研究钨壁条件下高 Z 杂质以及加料率对台基区微观不稳定性和输运的影响，探索提高台基区约束性能的方案。在 ITER 国际托卡马克物理活动框架下，从技术、实验、理论、模拟等多方面主导和

参与台基物理专题组的国际联合研究，促进成果在 ITER 未来科学研究中的应用。

考核指标：（1）建立钨壁条件下台基区物理模型，对 H<sub>2020</sub> 定标率进行校验；（2）提出钨壁条件下台基区约束性能改善方案，等离子体约束性能恢复到 H<sub>98</sub> 定标率的水平；（3）在台基物理专题组的联合实验研究中，至少有一项由我国科研人员或装置主导的国际托卡马克联合实验研究；联合实验研究的总体参与度达到 50%；每年在专题组会议报告不少于两次。

关键词：全钨壁、台基、输运、约束定标律、微观不稳定性、国际托卡马克物理活动

## 6. 螺旋磁场结构中聚变等离子体不稳定性与输运研究

研究内容：在反场箍缩、托卡马克和仿星器磁约束位形下开展螺旋磁结构对等离子体不稳定性和输运影响的共性研究，为未来聚变堆发展安全稳定的运行方案提供科学基础，主要包括：开展高阶螺旋态等离子体，特别是螺旋态的成型物理机制和控制方法的研究，对等离子体不稳定性和输运进行调控，优化运行参数；结合电磁边界调控，在具有不同螺旋结构的等离子体中，研究螺旋磁拓扑结构与等离子体宏观磁流体动力学稳定性的相互作用；研究从低模到高模宽范围螺旋磁场对粒子输运、热输运和电流输运的影响；研究不同磁场和等离子体条件下快电子的约束和损失机制，通过调控磁场螺旋结构寻求安全有效的逃逸电子防护方法。

考核指标：（1）在同一环形装置上实现反场箍缩、托卡马克和仿星器三种位形的运行（反场箍缩：反场因子  $F \leq 0$ ，托卡马克：安全因子  $q_a \geq 2$ ，仿星器：真空  $t \geq 0.03$ ）；（2）在反场箍缩位形下实现边界螺旋场可调控模  $n \geq 6$ ；（3）在反场箍缩位形下，优化螺旋位形和提升等离子体约束，实现最大极向比压  $\beta_p$  达到 15%，维持时间大于能量约束时间；（4）获得不同磁场位形下快电子的空间和能量分布。

关键词：磁约束环形装置、螺旋磁场、等离子体不稳定性、安全因子、输运、快电子

## 7. 面向未来聚变堆的射频波加热与电流驱动集成建模程序包研发

研究内容：围绕未来聚变堆运行模式的设计与模拟分析需求，开展射频波的物理建模与数值模拟研究，开发具有自主知识产权的程序，以支撑高物理可靠性的集成模拟，包括：建立电子回旋波、低杂波和螺旋波的传播、加热与电流驱动过程的物理模型；发展射频波相关的高效模拟算法、模型与程序模块；结合离子回旋加热与电流驱动模块形成完备的射频波模拟程序包；应用该程序包，针对国内聚变装置的运行设计开展射频波加热与电流驱动优化分析。

考核指标：（1）开发出具有自主知识产权、可用于聚变堆集成模拟研究的电子回旋波、低杂波与螺旋波的物理程序模块，与

国际上主流的、具有高保真度的波模拟程序（如 GENRAY、CQL3D）完成准确性校验；（2）建立能高效模拟电子回旋波、低杂波与螺旋波的简化模型，能适用于等离子体放电过程的快速模拟，要求波传播路径、功率沉积率及电流驱动效率准确性与高保真模拟程序相比最大偏差小于 20%；（3）形成包含电子回旋波、低杂波、螺旋波、离子回旋波的射频波加热与电流驱动的完备程序包，并接入到集成建模程序中，对国内托卡马克装置的加热与电流驱动方案完成对比分析和优化。

关键词：电子回旋波、低杂波、螺旋波、离子回旋波、射频波加热与电流驱动、集成建模

## 8. 基于多普勒反射计的湍流综合诊断研究

研究内容：针对聚变堆等离子体条件下多尺度湍流诊断和湍流输运物理研究，发展多尺度湍流和剪切流诊断技术，发展基于第一性原理的虚拟湍流诊断程序，结合机器学习方法，获得自洽的多尺度湍流波数谱；发展能够刻画托卡马克约束模式形成与转化的全空间非线性约化输运模型。实现基于虚拟诊断程序的湍流谱智能重建和预测，实现基于约化输运模型的等离子体约束模式智能预测，在国内托卡马克典型等离子体放电条件下，对综合诊断程序和输运模型进行实验验证。

考核指标：（1）利用异构集成式系统级封装（SiP）、数字化相控阵天线等前沿技术，发展小型化、高性能多普勒反射计诊断

系统，增强其对未来聚变堆等离子体诊断的可近性；实现同时测量等离子体边界区域（ $\rho = 0.7-1$ ）同一空间位置至少 6 个不同波数的湍流强度，从而获得波数跨越至少一个量级的湍流谱；湍流波数谱时间分辨率至少 100 ms，误差不超过 30%；（2）自主开发基于动理学湍流模拟和自洽全波解的、与多普勒反射计匹配的第一性原理虚拟诊断程序，利用人工智能（AI）技术，建立可信的湍流虚拟数据库；构建实时多普勒反射信号重建模型，所预测的主导湍流波数谱与实验测量误差小于 30%；（3）自主开发能够刻画托卡马克约束模式形成与转化间非线性约化输运模型，能描述非燃烧情形下各类先进约束模式的形成与转化，开展其形成条件的预测，在国内装置开展验证，对实验数据中的约束模式转换预测准确率达到 70%。

关键词：多普勒反射计、多尺度湍流、合成诊断、AI 重建、约化输运模型、运行模式

## 9. 面向聚变堆的被动感应线圈抑制逃逸电流的实验研究

研究内容：逃逸电子的非能动控制是未来磁约束聚变堆的关键问题。等离子体破裂期间电流猝灭在线圈上感应电流可以获得非能动的共振扰动场，从而实现共振扰动场控制逃逸电子的产生，达到破裂缓解功能。针对未来聚变堆逃逸电子危害装置安全运行问题，开展磁扰动等因素下逃逸电子的产生和损失理论研究；依托现有托卡马克装置开展被动感应线圈工程设计

和工程建设，进行被动线圈抑制逃逸电子的可靠性验证；依托人工智能预测等离子体破裂和被动感应线圈的智能主动控制，开展被动感应线圈抑制逃逸电子的实验研究；开展未来聚变堆被动感应线圈可行性研究。

考核指标：（1）建立包含磁扰动效应的逃逸电流产生及演化的物理模型，发展相应的具有自主知识产权的数值计算代码；（2）在国内托卡马克装置上建立被动感应线圈，感应电流份额达到总等离子体电流的6%以上；（3）依托国内托卡马克装置开展实验验证，实现等离子体电流百千安量级放电下逃逸电子的有效抑制，逃逸电流小于总等离子体电流的5%；（4）参考国内已有的聚变堆设计方案，完成被动感应线圈工程设计。

关键词：破裂保护、逃逸电子、逃逸电流、被动感应线圈、共振扰动场、非能动安全保护

## 10. 面向聚变堆的高速弹丸注入加料技术研究

研究内容：针对未来磁约束聚变堆燃烧等离子体运行条件下芯部加料的技术难题，发展可以将燃料粒子直接注入到堆芯等离子体的弹丸注入加料技术。优化和发展氢同位素等固体弹丸的连续制备技术，模拟分析燃料气体冷凝及冰柱的成型过程；发展高速弹丸加速技术，实现弹丸速度达数百米每秒；研制多参数集成诊断系统，精准监测弹丸形貌、速度及注入频率，量化影响弹丸加料效果的关键因素。基于粒子平衡方法，建立弹丸注入加料反

馈控制等离子体密度的算法模型，并在现有托卡马克装置上验证弹丸注入加料反馈控制等离子体密度的可行性。构建能够预测高温等离子体中弹丸消融及注入深度的物理模型，通过弹丸制备、加速、诊断、密度反馈控制等多技术协同，形成面向未来聚变堆芯部加料的完整解决方案。

考核指标：（1）自主研发一套高速燃料弹丸注入系统，单发弹丸的最大粒子数不低于  $6 \times 10^{20}$ ，弹丸最大发射速度不低于 800 m/s，百发出口破损率不高于 30%，发射频率可调，最大频率可达 10 Hz；（2）建立弹丸消融及注入等离子体深度的预测和控制模型，其模型预测深度与实验偏差不大于 20%；（3）在国内磁约束聚变实验装置上开展弹丸注入加料实验，实现弹丸加料反馈控制高约束模等离子体密度时间不低于 20 s，验证弹丸注入系统的可靠性和稳定性。

关键词：芯部加料、弹丸注入、弹丸消融、破损率、发射频率、密度反馈控制

## 11. 先进准等动力仿星器关键物理和技术研究

研究内容：面向仿星器聚变技术路线的未来发展需求，自主开发仿星器位形优化和三维高温超导线圈设计程序，开展新一代先进准等动力位形仿星器物理及工程设计，解决三维磁场位形和三维线圈的物理、工程协同耦合难题；开展先进准等动力位形下的大规模第一性原理数值模拟，通过研究宏观磁流体不稳定性、

介观阿尔芬本征模及微观湍流输运，全面评估先进仿星器设计的稳定性和约束性能；开展高温超导材料三维应变情况下机械-电-磁-热多物理场下的应力应变行为研究，搭建大尺寸三维高温超导线圈制备及测试平台，研制高场下的三维线圈高温超导电缆，以及米级三维单匝高温超导线圈，开展综合性能测试；基于理论推导和数值分析开展先进准等动力仿星器磁岛偏滤器设计。

考核指标：参照装置大半径 2.0 ~ 2.5 m 情况，（1）完成新一代先进准等动力仿星器的物理及工程方案设计，固定边界平衡线性气球模稳定的 $\beta$ 阈值  $\geq 4\%$ ，且聚变反应堆尺寸下 $\beta \geq 2\%$  时 2 ms 内，芯部无碰撞 $\alpha$ 粒子损失  $\leq 2\%$ ，线圈在等离子体表面残余法向磁场的归一化均值  $\leq 5 \times 10^{-3}$ ；（2）基于 ReBCO 材料制备该先进准等动力仿星器线圈最大曲率、挠率应变段的高温超导导体样品，在 12T 背场下载流达到  $20 \text{ A/mm}^2 @ 4.2\text{K}$ ，在此基础上研制一饼三维单匝高温超导线圈，曲率、挠率半径  $\geq 5 \text{ cm}$ ，制造误差  $\leq 2 \text{ mm}$ ，工程电流密度  $\geq 10 \text{ A/mm}^2 @ 77\text{K}$ ；（3）开发出适应三维复杂磁场结构的偏滤器设计理论模型及程序，将偏滤器设计从依赖经验的方式转变为理论驱动、可系统优化的过程，在此基础上给出先进准等动力仿星器的三维磁岛偏滤器设计方案。

关键词：先进仿星器、准等动力、第一性原理、高温超导、线圈设计、磁岛偏滤器

## 12. 聚变堆氘化水处理工程技术研究

研究内容：针对磁约束聚变堆氘化水处理及气氛中氘化水蒸气捕集需求，以工程化技术研发、系统验证及评估为主要任务，开展 GW 级聚变功率下聚变堆中氘化水处理和氘化水蒸气捕集工程化工艺研发及优化，重点研究水精馏工艺、联合电解催化交换工艺、高浓氘化水处理工艺和喷淋洗脱氘化水蒸气捕集工艺，掌握高可靠、低能耗、低成本且涵盖低、中、高比活度氘化水处理和氘化水蒸气捕集的组合工艺；开展系统工艺级联验证，实现水中氘的回收和再利用，掌握关键工程技术，具备级联运行能力；基于现有可行的技术方案，发展新型氘化水处理技术，对关键材料、关键器件、关键工艺及全流程级联工艺进行系统研发、验证及考核，解决含氘水蒸气捕集及氘化水减容、富集到氘回收的全工艺链问题。

考核指标：（1）开发水精馏高效分离规整填料，填料直径  $\geq 350\text{mm}$ ，填料等板高度  $\leq 9\text{cm}$ ；基于热泵节能工艺完成每小时百公斤级水精馏运行考核，相同处理工况下系统综合能耗相较纯电供能工艺降低 60% 以上；完成涉氘运行可靠性考核，除氘因子（原料水氘浓度与贫化水氘浓度之比） $\geq 10000$ ；（2）开发氢-水同位素催化交换规整填料，直径  $\geq 350\text{mm}$ ，完成每小时 50 公斤级联合电解催化交换工艺考核；开展节能工艺研究，综合能耗相较现有工艺降低 20% 以上；开发针对  $10^{11}\text{ Bq/L}$  氘浓度的氘兼容 PEM

电解槽以及高稳定规整填料，PEM 电解槽使用寿命超过 1 年，规整填料中活性金属流失率  $\leq 1\%$ /年，提供关键材料氚兼容评价数据；完成  $\sim 10^8$  Bq/L 氚化水处理工艺可靠性考核，除氚因子（原料水氚浓度与贫化氢中氚浓度之比） $\geq 10^5$ ；（3）开发用于气氛中氚化水蒸气高效捕集的喷淋洗脱规整填料，填料直径  $\geq 600\text{mm}$ ，填料等板高度  $\leq 12\text{cm}$ ，完成  $1500 \text{ Nm}^3/\text{h}$  处理量喷淋洗脱工艺运行考核；完成  $\sim 10^5$  Bq/ $\text{Nm}^3$  含氚气涉氚运行可靠性考核，除氚因子（进气水蒸气氚浓度与排气水蒸气氚浓度之比） $\geq 1000$ ；（4）完成喷淋洗脱-水精馏-联合电解催化交换-低温精馏级联试验，最大水处理规模  $\geq 100 \text{ kg/h}$ ；开发氚化水蒸气捕集-低浓氚化水减容-高浓氚化水浓缩-氚提取全流程工艺模型，完成工艺效率和经济性评估；形成每小时百公斤级中低浓氚化水（ $10^5$  Bq/L-  $10^{11}$  Bq/L）及每小时公斤级高浓度氚化水（ $10^{12}$  Bq/L 以上）工程处理方案；（5）累计动氚量  $\geq 100 \text{ Ci}$ 。

关键词：氚化水、氚回收、水精馏、催化交换、蒸汽捕集、喷淋

### 13. 先进包层用高温低活化钢批量化制备及模块制造关键技术研究

研究内容：针对未来聚变堆先进增殖包层对高温结构材料的需求，开展低活化铁素体马氏体钢的材料成分与热处理工艺设计与优化；掌握温度上窗口达到  $650^\circ\text{C}$  的先进低活化钢吨级制备技

术及生产能力，开展材料服役温度区间的热物性能数据库和相关材料的行业标准草案研究；开展该材料同种、异种材料连接技术开发，实现液态、固态包层模块的制造，并开展高热负荷及气压测试等验证实验，为未来聚变堆全尺寸包层的制造奠定材料与技术基础。

考核指标：（1）研发出先进低活化铁素体马氏体钢，单锭重量大于 3 吨，制造出 60-80 mm 厚系列规格的热轧板材与尺寸不小于 200 mm×300 mm×1000 mm 的锻件，工业化试制不小于 3 批次；材料性能（力学测试以标准尺寸样品测试结果为准）：650 °C 屈服强度  $\geq 300$  MPa，延伸率  $\geq 18\%$ ；650 °C/110 MPa 蠕变断裂时间  $> 1000$  h；DBTT  $\leq -50$  °C；400 °C、500 °C、600 °C 条件下 50 dpa（非峰值区域）、10 appm He/dpa 及 40 appm H/dpa 三束离子辐照后，肿胀率  $< 0.5\%$ ；建立所研发先进低活化铁素体马氏体钢在服役温度区间的热物性能数据库并制订该材料的行业标准草案；（2）完成 3 个批次百公斤级焊材制造，熔覆金属 650 °C 屈服强度  $\geq 300$  MPa，延伸率  $\geq 18\%$ ；（3）采用所研发的钢材料加工出钨壁（覆钨厚度 2 mm）面积不小于 0.2 m<sup>2</sup> 的包层第一壁模块，全模块能通过 1000 次 1 MW/m<sup>2</sup> 的高热负荷测试，钨钢界面不得出现直径大于 2 mm 的缺陷；（4）采用所研发的钢材料加工出液态及固态包层测试模块，利用所制造的测试模块分别完成不小于 24 小时的超临界二氧化碳和氦气（最高温度  $\geq 500$  °C；运行压力 8 MPa）

与 600 °C 流动锂铅（针对液态包层）加载实验后，测试模块三维方向尺寸变形量均小于 0.5%。

关键词：高温低活化钢、先进包层、批量化制备、模块制造

#### 14. 平板结构偏滤器靶板的制备及服役性能研究

研究内容：针对未来聚变堆偏滤器靶板面临的高热负荷、强辐照和复杂电磁力等苛刻服役要求，开展先进热沉材料研发、工业化生产和靶板部件制造、关键服役性能测评。研发具有高热稳定性、高导热、高强度、耐辐照的 ODS-Cu 热沉材料，开展软化温度、高温热导率、高温力学性能、抗离子辐照性能研究，形成材料数据库并提出相关材料的行业标准草案；建立 ODS-Cu 工程化板材的质量稳定制备工艺，超声探伤、弯曲和密封性能达到相关标准要求；优化靶板结构，发展大尺寸靶板制造技术，提高钨与热沉连接的可靠性，发展靶板制造新工艺和钨与热沉材料连接新技术，研制出聚变堆偏滤器靶板部件；开展靶板在聚变实验装置中的可靠性评价和稳态高热负荷测试，为未来聚变堆偏滤器靶板提供制造技术和材料支持。

考核指标：（1）ODS-Cu 工程化板材性能：① 氧化物颗粒尺寸  $\leq 50 \text{ nm}$ ，数密度  $\geq 10^{20}/\text{m}^3$ ，热力耦合作用下不发生聚集长大；② 软化温度  $\geq 930 \text{ }^\circ\text{C}$ ，650 °C 保温 2h 后热导率和抗拉强度退化程度  $\leq 10\%$ ；③ 测试室温、200°C、300°C、400°C、500°C、600°C、650°C 的热导率和抗拉强度，650 °C 热导率  $\geq 330 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、抗拉

强度  $\geq 150$  MPa,  $650$  °C/50 MPa 稳态蠕变速率小于  $10^{-8}$  s<sup>-1</sup>; ④  $400$  °C/100 dpa 重离子辐照后肿胀率  $\leq 0.5\%$ ; (2) ODS-Cu 工程化板材的稳定化制造: 板材尺寸  $\geq 1800$  mm $\times$ 200 mm $\times$ 25 mm, 超声探伤无缺陷 (当量直径低于分辨率极限, 即  $\leq 1.6$  mm), 弯曲  $60^\circ$  后表面无裂纹; 密封腔体经 7 MPa 保压 30 min 后压降  $\leq 0.01$  MPa,  $200^\circ$ C 烘烤下漏率  $< 1.0 \times 10^{-8}$  Pa $\cdot$ m<sup>3</sup>/s; 5 批次板材上述性能变异系数  $\leq 15\%$ ; (3) 靶板制造: 各层金属连接界面的结合强度不低于较弱母材的强度, 界面超声探伤无缺陷 (当量直径低于分辨率极限, 即  $\leq 1.6$  mm); 焊接后热沉材料的热导率和抗拉强度退化程度  $\leq 10\%$ ; (4) 可靠性评价: 靶板通过稳态 20 MW/m<sup>2</sup>、2000 次电子枪热负荷测试, 传热性能退化  $< 20\%$ , 钨表面温度不高于再结晶温度; 靶板在高参数运行的托卡马克装置内考核累计时间  $\geq 90$  天, 传热性能退化程度  $< 15\%$ 、漏率不大于制造完成时的指标。

关键词: 热沉铜合金、平板结构偏滤器、靶板制备、板材性能、电子枪热负荷测试、服役性能

## 15. 聚变堆能谱条件下中子辐照 RAFM 钢力热性能评估

研究内容: 聚变中子辐照下包层结构材料的力热性能是聚变堆工程设计与寿命预测的重要支撑。目前尚无可用的聚变中子源, 无法开展材料聚变中子辐照实验。面对聚变能加速发展的迫切需求, 亟需利用裂变和散裂中子辐照的实验数据, 耦合计算模拟与

机器学习方法，开展聚变堆能谱条件下中子辐照增殖包层主要候选结构材料 RAFM 钢的力热性能评估。面向聚变中子辐照损伤重大挑战，收集国内已有数据和国内外公开的数据，整理、分析、筛选和评估，形成可靠的数据库作为基础，针对聚变堆用 RAFM 钢的应用需求，结合机器学习等先进算法，发展集成主要合金化元素与嬗变气体效应的辐照缺陷长时高效模拟技术，实现高剂量聚变中子辐照下材料微观结构演化的精确预测；结合已有的高通量裂变中子、散裂中子、多离子束辐照实验数据，发展基于大模型驱动和特征识别的数据智能挖掘方法，融合领域知识和多源异构数据，建立辐照微结构与宏观性能（硬度、屈服强度、蠕变、肿胀、热导率等）的多维度映射模型；构建聚变中子与裂变中子辐照下材料宏观性能退化差异的量化预测模型，实现聚变堆能谱条件下受中子辐照的 RAFM 钢力热性能预测，并通过高通量裂变中子、散裂中子、多离子束辐照实验数据库和模型因素评估预测结果可信度，为聚变堆设计提供相关材料辐照性能的数据参考。

考核指标：（1）建立经过分析、评估过的 RAFM 钢裂变中子、散裂中子、多离子束辐照实验数据库（辐照剂量 $> 10$  dpa 数据包括微观结构与宏观性能，数据量不少于 1000 条）；（2）发展考虑 RAFM 钢中主要合金化元素与嬗变气体效应的辐照缺陷长时高效模拟技术，构建辐照微结构与宏观性能的多维度映射模型，对比不少于 5 组的已有 RAFM 钢高剂量（ $\geq 10$  dpa）裂变与散裂

中子辐照数据，在相同的模拟参数条件下所预测的硬度、屈服强度、辐照蠕变、肿胀、热导率等误差低于 30%；（3）建立聚变中子与裂变中子辐照下 RAFM 钢性能退化差异的量化模型，基于已有的裂变中子辐照数据及（2）中经过验证的模拟参数，实现不同剂量（10 dpa、20 dpa、30 dpa）聚变中子辐照下材料硬度、屈服强度、辐照蠕变、肿胀、热导率等服役性能的预测，通过裂变中子、散裂中子、多离子束辐照实验数据库和模型因素评估预测结果，误差 < 50%，并形成可供聚变堆设计参考的相关材料辐照性能数据库。

关键词：聚变中子辐照、RAFM 钢、计算模拟、机器学习、力热性能评估、辐照性能数据库

## 16. 托卡马克等离子体运行全过程参数剖面演化模拟研究 （青年科学家类）

研究内容：紧密结合托卡马克等离子体运行全过程（包括电流爬升、平顶、下降等阶段），针对托卡马克运行模式（欧姆电流驱动模式、辅助加热模式、稳态运行模式等）不同阶段下等离子体随时间的演化过程，通过简化物理模型、开发快速算法等手段，开展等离子体关键参数剖面形成过程的模拟研究，以及等离子体平衡演化、粒子约束和能量输运等物理特性研究，为托卡马克等离子体运行全过程提供技术支持。

考核指标（明确一个主攻方向，完成下列目标之一）：（1）提

出并建立一种新的基于聚变堆等离子体运行某一阶段的多成分等离子体平衡快速求解方法；（2）编写具有自主知识产权的、可用于分析含时间演化的能量或粒子分布和输运的模拟程序，并对程序进行校验或与实验进行验证；（3）结合基于物理原理的数值模拟手段，发展机器学习方法，预测含时间演化的等离子体行为，并结合理论模拟和实验诊断进行对比验证；（4）结合大型集成模拟程序，发展等离子体参数剖面时空演化相关程序模块，并结合实验诊断进行对比验证。

关键词：托卡马克运行全过程、运行模式、等离子体行为、剖面时空演化、机器学习、集成模拟

### **17. 聚变等离子体若干关键诊断技术的研究(青年科学家类)**

研究内容：紧密结合托卡马克等离子体物理实验及未来聚变堆运行控制的重要需求，针对磁约束聚变等离子体关键诊断技术，开展（1）诊断工程技术；（2）虚拟诊断技术；（3）先进分析技术等研究。

考核指标（明确一个主攻方向，完成下列目标之一，并应用到磁约束聚变装置或聚变堆运行控制关键问题的解决中）：（1）创新性地提出一种全新的诊断方法，并对其可行性开展验证；（2）面向 ITER 或者未来聚变堆，针对其中一项关键诊断提出诊断方案，并研究其可行性；（3）围绕聚变等离子体关键诊断问题，发展具有自主知识产权的虚拟诊断。

关键词：托卡马克、等离子体诊断、运行控制、诊断工程技术、先进分析技术、虚拟诊断

### 18. 聚变堆高效换热技术研究（青年科学家类）

研究内容：面向未来聚变堆高效换热技术，（1）研究典型包层构型及复杂工况下冷却工质的流动传热特性；（2）研究聚变堆一二回路能量高效耦合，开展等离子体启动、稳定运行、正常及停堆工况下电站功率的平衡研究，给出系统安全边界及控制策略，实现聚变功率与发电系统的高效安全耦合；（3）开展用于聚变装置原位测试的膜肋复合结构换热部件及相应诊断系统的集成设计，研制可以在低压低流量条件下运行的、基于汽液分离沸腾换热的膜肋复合结构偏滤器靶板单元，开展膜肋复合结构传热性能及临界热流的理论建模及其沸腾换热机制研究。

考核指标（明确一个主攻方向，完成下列指标之一）：（1）建立适应不同工况的典型包层多物理耦合分析物理模型和计算程序，完成该计算程序测试和验证；（2）结合 ITER 或国内已有聚变装置设计方案的参数，完成不同工况下（等离子体启动、稳定运行、正常及停堆）一二回路高效耦合、二回路高效发电技术的设计方案，并开展实验验证；（3）建立膜肋复合结构传热性能及临界热流的理论模型，阐明膜肋复合结构沸腾换热机制，给出汽液分离的结构优化设计；（4）发展膜以及膜肋复合结构偏滤器靶板单元批量制备工艺和方案，膜肋复合结构偏滤器靶板单元（受

热面  $\geq 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) 在低压 ( $\leq 6 \text{ atm}$ ) 低流量 ( $\leq 5 \text{ L/min}$ ) 水冷条件下,  $20 \text{ MW/m}^2$  高热负荷作用时样件表面最高温度  $\leq 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ , 连续稳定运行时间  $\geq 20 \text{ min}$ 。

关键词: 聚变堆一二回路、包层、偏滤器、热工水力、沸腾换热、批量制备

### 19. 边界等离子体对壁的腐蚀行为与等离子体性能相互影响机制研究 (青年科学家类)

研究内容: (1) 针对聚变堆中多因素协同下壁材料腐蚀和等离子体性能之间相互影响的复杂问题, 依托国内现有托卡马克装置或实验室平台, 开展包括含杂质等离子体的多源辐照下聚变堆壁材料损伤行为研究, 研究硼膜溅射寿命及钨硼沉积物对装置运行的影响; (2) 开展不同杂质在刮削层和偏滤器区域运输的理论、模拟和实验研究, 发展适用于该区域的钨杂质输运理论与模拟方法。

考核指标 (明确一个主攻方向, 完成下列目标之一): (1) 发展一种包含边界等离子体环境、材料离位损伤、温度等多物理场耦合下的动态原位实验方法, 掌握偏滤器及第一壁不同参数等离子体条件下材料的腐蚀以及杂质产生规律; (2) 开展 ITER 硼化壁处理以及放电后钨硼再沉积层的薄膜形态预测, 在等离子体放电条件下开展硼膜、钨硼再沉积膜制备实验; 对沉积硼膜开展稳态氢、氦等离子体辐照实验, 系统性获得硼膜的寿命数据以及燃

料滞留数据；(3) 开发一套壁材料腐蚀和杂质输运模拟程序，能够自洽模拟在聚变堆复杂环境下壁材料的腐蚀行为、杂质从边界进入芯部的输运过程以及杂质对等离子体性能的影响；(4) 理解多因素耦合条件下壁材料腐蚀与等离子体性能相互影响的主要物理机制，发展出一种可控制钨刻蚀、杂质并与芯部等离子体性能兼容的新方法或新技术。

关键词：边界等离子体、偏滤器、第一壁、材料腐蚀、杂质输运、壁处理

## **20. 磁约束聚变物理前沿问题研究（青年科学家类）**

研究内容：针对依据新基准制定的 ITER 研究计划和目前托卡马克物理前沿科学问题，依托国内外磁约束聚变实验装置，在国际托卡马克物理活动（ITPA）框架下开展各个专题组相关任务的理论、模拟、诊断和实验研究，主要包括：(1) 宏观磁流体力学与破裂及控制专题中实时锯齿控制研究；(2) 约束与输运专题中电子和多离子粒子输运、同位素定标和密度峰化研究；(3) 台基物理专题中低密度梯度、低碰撞率高约束模式等离子体中的台基参数定标研究；(4) 快粒子物理专题中评估三维扰动场中快粒子损失及其与等离子体响应和边缘局域模控制的相关性研究；(5) 偏滤器与刮削层专题中刮削层内钨杂质输运及其向台基的径向输运研究；(6) 集成运行方案专题中临近低-高约束模式转换功率阈值的、可形成杂质屏蔽效果的运行方案研究；(7) 诊断专题中利

用伽马射线测量逃逸电子能量研究。

考核指标（明确一个主攻方向，参与国际托卡马克物理活动专题工作组指定的研究任务，并完成下列目标之一）：（1）在国内磁约束聚变实验装置上主持完成了一项实验研究工作；（2）提出一种实验分析方法或物理模型，并发展相应的模拟程序；（3）发展一种新的实验方法或测控技术。为国际托卡马克物理活动的研究任务做出贡献。

关键词：磁约束聚变物理、ITER 研究计划、国际托卡马克物理活动、专题组