

极端条件电磁能装备科学基础重大研究计划

2024 年度项目指南

极端条件电磁能装备科学基础重大研究计划以电磁能装备领域的国家重大战略需求为牵引，以建立电磁热力多场耦合极端冲击条件电磁能装备基础理论为核心，通过在等价实验机理、在线测量原理、复杂系统建模理论、快速数值求解算法、材料评价与设计方法和数据处理及分析方法方面的不断创新，为电磁能装备的研制及发展提供科学基础。

一、科学目标

聚焦电磁能装备及其所用储能电介质材料和直线推进金属材料在多场耦合极端冲击条件下的构效关系和物性演化，以材料调控为基础，以耦合测试为手段，以长效服役为目标，揭示电磁热力多场耦合极端冲击条件电磁能与材料相互作用时空演化机理，构建电磁热力多场耦合极端冲击条件电磁能装备科学基础，引领电磁能装备研发模式变革，产生重大原始创新，占领电磁能技术领域制高点，形成代表世界电磁能技术水平的战略科技力量。

二、核心科学问题

本重大研究计划的核心科学问题是：电磁热力多场耦合极端冲击条件电磁能与材料相互作用时空演化机理。

三、2024 年度资助研究方向

本重大研究计划所述的电磁能装备特指实现电磁能与动能间

瞬时高功率转换的装备；所述的极端条件特指多场耦合和极端冲击的共同作用，其中极端冲击指的是极高功率、极短时间（ms级）、极大电流（MA级）和极高速度（ $\geq 2\text{km/s}$ ），多场耦合指的是电磁热力共同作用下的多物理场强耦合。本年度重大研究计划所述的电磁能装备材料聚焦电磁能装备所用的直线推进金属材料（含轨道和运动体）和储能材料。2024年度各项申请应符合上述限定条件。

（一）重点支持项目。

拟资助（但不限于）以下方向：

1. 直线推进电磁能装备材料物性演变机理与非线性构效关系。

研究极端条件电磁能装备直线推进金属材料（轨道和运动体）的各参量（电导率、弹性模量、屈服强度、延伸率、软化温度、表面硬度、海洋环境适应性等）的时空演化规律；建立极端条件电磁能装备直线推进金属材料在多场耦合强冲击下的物性参数演变模型；建立评价各参量服役条件演变规律的指标体系。

2. 直线推进电磁能装备高速载流摩擦界面损伤机制与调控。

面向电磁能装备高速载流摩擦磨损的极端条件，开展高速载流摩擦磨损界面行为研究，建立高速载流摩擦磨损模型，揭示界面沉积物的形成和演化机制，实现对不同发射条件下电枢和导轨磨损量的定量预测；开展界面损伤抑制策略研究，实现对磨损量的有效调控。

3. 高能量密度长寿命储能电介质材料与器件极端条件物性演化的原位测量与失效机理表征方法研究。

针对高能量密度长寿命储能电介质击穿破坏与循环充放电过程中的性能劣化问题，发展跨尺度原位表征方法，同步测量电介质材料击穿时的电流、温度、应力应变、局域电场及陷阱能级等的时空演化。以此为基础，发展原位测量技术，表征电容器结构物性演化与失效过程；进一步结合大数据分析、机器学习和人工智能，揭示高能量密度储能电介质材料与器件失效机理，指引材料与器件设计与优化。

4. 电磁能装备极端条件服役建模与性能评估方法研究。

发展电磁能装备极端条件电磁热力多场耦合超高速载流运动下的高精度数值建模方法，建立多场耦合动态特性分析模型；发展电磁能装备发射动力学特性建模方法研究，建立装备发射动力学特性快速分析模型；研究极端条件电磁能装备与材料相互影响机理，提出电磁能装备动态性能评估的指标体系和方法。

5. 电磁能装备极端条件颠覆性直线推进新材料技术研究。

面向未来电磁能装备发展需求，应用人工智能和大数据等前沿技术，探索关键性能显著提升、满足极端条件电磁热力多场耦合服役需求，促进电磁能装备轻量化和长寿化的颠覆性新概念材料。直线推进材料要求：（1）轨道材料，屈服强度 $\geq 750\text{MPa}$ ，导电率 $\geq 60\% \text{IACS}$ ，伸长率 $\geq 10\%$ ，软化温度 $\geq 700^\circ\text{C}$ ，弹性模量 $\geq 120\text{GPa}$ ，表面硬度 $220\text{--}300\text{HV}$ ，相关工艺可用于大尺寸制备（1吨

以上)，表面抗烧蚀性满足 2000℃ 下的烧蚀量不大于铜合金的 1/10；（2）运动体材料（单一或多种金属复合材料），屈服强度 $\geq 500\text{MPa}$ ，导电率 $\geq 35\% \text{IACS}$ ，伸长率 $\geq 12\%$ ，软化温度 $\geq 380^\circ\text{C}$ ，弹性模量 65-75GPa，表面硬度 100-160HV，熔点 $\geq 600^\circ\text{C}$ ，密度 $\leq 2.8\text{g/cm}^3$ ；（3）二者匹配性能，轨道表面和运动体材料之间的干摩擦系数 ≤ 0.15 ，滑动摩擦系数 ≤ 0.02 。

6. 电磁能装备极端条件颠覆性电介质储能新材料技术研究。

面向未来电磁能装备发展需求，应用人工智能和大数据等前沿技术，探索关键性能显著提升、满足极端条件电磁热力多场耦合服役需求，促进电磁能装备轻量化和长寿化的颠覆性电介质储能新材料。要求储能电介质薄膜材料，储能密度 $\geq 8\text{MJ/m}^3$ （涵盖电压范围 2~10kV），充放电频率 ≥ 20 次/分钟（毫秒级放电），寿命 ≥ 2 万次，放电效率 $\geq 95\%$ （10kHz 范围内），自放电时间常数 $\geq 1000\text{s}$ （最高工作场强）。

7. 电磁能装备极端条件新型储能器件技术研究。

面向电磁能装备储能小型化长寿命的要求，开展新型储能器件的设计和制备技术研究，要求体积储能密度 $\geq 30\text{kWh/m}^3$ ，质量储能密度 $\geq 30\text{Wh/kg}$ ，放电体积功率密度 $\geq 0.5\text{GW/m}^3$ ，放电质量功率密度 $\geq 0.5\text{MW/kg}$ ，充电倍率 $\geq 6\text{C}$ 和放电倍率 $\geq 60\text{C}$ 循环充放电寿命 ≥ 1 万次。

（二）集成项目。

拟资助以下方向：

1. 电磁能装备结构材料超高速直线推进条件下的组织结构演变、多场耦合响应机理及多尺度设计与评价研究。

针对电磁超高速推进极端冲击环境对装备结构材料力-热-电等综合性能的更高要求，以直线推进材料等为研究对象，模拟材料在高速（ $\geq 2000\text{m/s}$ ）、高升温速率（ $\geq 10^5\text{K/s}$ ）、高载流（ $\geq 10^{10}\text{A/m}^2$ ）、高应变率（ $>10^6/\text{s}$ ）等耦合极端条件下的加载行为；发展材料特征微结构在高受载条件下梯度变化规律的准原位表征手段，形成电磁耦合环境下材料形变起源、织构发展、组织演变到响应完成的多尺度时空连续描述方法，揭示材料在极端环境下的演变规律与失效机理，得到材料失效判据；基于电磁环境组织结构响应，形成结构材料从纳观（位错运动、纳米析出相等）、微观（晶界、相界结构等）、介观（晶粒分布、变形织构等）和宏观（结构-应力分布规律等）多尺度连续性集成计算方法；突破结构材料强韧性协同提升、极限耐热、高耐磨、力各向异性耦合调控等关键技术，获得高综合性能直线推进材料，并在指定的电磁能装备上开展典型示范验证。枢轨材料实物指标要求为：（1）轨道材料，屈服强度 $\geq 750\text{MPa}$ ，导电率 $\geq 60\% \text{IACS}$ ，伸长率 $\geq 10\%$ ，软化温度 $\geq 700^\circ\text{C}$ ，弹性模量 $\geq 120\text{GPa}$ ，表面硬度 220-300HV，相关工艺可用于大尺寸制备（1吨以上）；（2）运动体材料（单一或复合材料），屈服强度 $\geq 500\text{MPa}$ ，导电率 $\geq 35\% \text{IACS}$ ，伸长率 $\geq 12\%$ ，软化温度 $\geq 380^\circ\text{C}$ ，弹性模量 65-75GPa，表面硬度 100-160 HV，熔点 $\geq 600^\circ\text{C}$ ，密度 $\leq 2.8\text{g/cm}^3$ ；（3）二者匹配性能，轨道

表面和运动体材料之间的干摩擦系数 ≤ 0.15 ，滑动摩擦系数 ≤ 0.02 。材料组织演变集成计算指标：开发从材料极端条件下的基本物性、组织演变到服役性能的高效计算软件，涵盖极端工况多场耦合下材料的相组成、织构演变、晶界结构、晶粒形貌等关键性能参数。

2. 电磁能装备极端条件轨道材料的一体化设计与大尺寸制备技术研究。

针对电磁能装备轨道材料的高可靠和长寿命技术要求，从材料本征性能统筹优化出发，开展高速载流摩擦副及涂层等材料的综合匹配与优化设计研究。主要包括：高热稳定性纳米结构与陶瓷颗粒协同增强复合材料的轨道材料的设计与制备，涂层与轨道材料热物性相匹配的界面设计、涂层成分优化与多层梯度微纳复合组织结构调控与制备。阐明面向电磁热力极端条件的整体设计原理，形成轨道材料一体化设计与制备方法，突破现有轨道材料寿命关键技术指标，取得性能具有重大提升的实物研究成果，并在电磁能装备上开展典型示范验证。直线推进材料实物指标要求为：（1）轨道材料，屈服强度 $\geq 750\text{MPa}$ ，导电率 $\geq 60\% \text{IACS}$ ，伸长率 $\geq 10\%$ ，软化温度 $\geq 800^\circ\text{C}$ ，弹性模量 $\geq 120\text{GPa}$ ，表面硬度 $220\text{--}300\text{HV}$ ，相关工艺可用于大尺寸制备（1吨以上）；（2）轨道材料涂层，导电率 $\geq 10\% \text{IACS}$ ，硬度与基体相当，表面抗烧蚀性满足 2000°C 下的烧蚀量不大于铜合金的 $1/10$ ，涂层与轨道材料可协调变形，与基体之间在不脱落、不裂纹条件下承受轴向变形量 \geq

3‰。

3. 电磁能装备储能电介质材料极端条件物性演化与性能劣化机理及性能提升设计研究。

针对电磁能装备极端条件对储能材料多场耦合综合性能的更高要求，以储能电介质材料为研究对象，从结构出发厘清科学问题，发展储能电介质从材料到样机极端服役过程的物性演化规律与性能劣化机理的表征方法，开发出从材料极端条件下的基本物性、组织演变到服役性能的高效计算软件；开展电介质储能材料的性能提升策略研究，突破现有储能材料的密度和寿命关键技术指标，取得性能具有重大提升的实物研究成果，并在电磁能装备上开展典型示范验证。计算软件涵盖材料的基本物性、组织演变到服役性能，对服役性能的预测评估精度 $\leq 10\%$ 。电介质材料实物指标要求为：储能电介质薄膜材料，储能密度 $\geq 8\text{MJ}/\text{m}^3$ （涵盖电压范围 2~10kV），充放电频率 ≥ 20 次/分钟（毫秒级放电），寿命 ≥ 2 万次，放电效率 $\geq 95\%$ （10kHz 范围内），自放电时间常数 $\geq 1000\text{s}$ （最高工作场强）。储能元件的实物指标要求为：充电秒级，放电毫秒级，储能 $\geq 1\text{kJ}$ ，储能密度 $\geq 4\text{MJ}/\text{m}^3$ ，单位储能的放电电流 $\geq 0.5\text{A}/\text{J}$ ，额定电压涵盖 2~20kV 范围，充放电频率 ≥ 20 次/分钟（毫秒级放电），放电效率 $\geq 93\%$ （10kHz 范围内），服役寿命 ≥ 1 万次（最高工作电压，环境温度 $-40^\circ\text{C}\sim 55^\circ\text{C}$ ）。

四、2024 年度资助计划

2024 年度拟资助重点支持项目 7 项左右，直接费用资助强度

约为 300 万元/项，资助期限为 4 年，申请书中研究期限应填写“2025 年 1 月 1 日至 2028 年 12 月 31 日”；拟资助集成项目 3 项左右，直接费用资助强度约为 1200 万元/项，资助期限为 4 年，申请书中研究期限应填写“2025 年 1 月 1 日至 2028 年 12 月 31 日”。鼓励来自电气、材料、数学、物理、化学、信息等不同学科领域的研究队伍联合参与申请。

五、申请要求及注意事项

（一）申请条件。

项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题的经历；
2. 具有高级专业技术职务（职称）；

在站博士后研究人员、正在攻读研究生学位以及无工作单位或者所在单位不是依托单位的人员不得作为申请人进行申请。

（二）限项申请规定。

执行《2024 年度国家自然科学基金项目指南》“申请规定”中限项申请规定的相关要求。

（三）申请注意事项。

申请人和依托单位应当认真阅读并执行本项目指南、《2024 年度国家自然科学基金项目指南》和《关于 2024 年度国家自然科学基金项目申请与结题等有关事项的通告》中相关要求。

1. 本重大研究计划项目实行无纸化申请。申请书提交日期为 2024 年 11 月 1 日 - 11 月 7 日 16 时。

(1) 申请人应当按照科学基金网络信息系统中重大研究计划项目的填报说明与撰写提纲要求在线填写和提交电子申请书及附件材料。

(2) 本重大研究计划将紧密围绕核心科学问题，对多学科相关研究进行战略性的方向引导和优势整合，成为一个项目集群。申请人应根据本重大研究计划拟解决的核心科学问题和本指南公布的拟资助研究方向，在分析国内外已有成果的基础上，明确新的突破点以及创新思路，自行拟定项目名称、科学目标、研究内容、技术路线和相应的研究经费等。

(3) 申请书中的资助类别选择“重大研究计划”，亚类说明选择“重点支持项目”或“集成项目”，附注说明选择“极端条件电磁能装备科学基础”，根据申请的具体研究内容选择相应的申请代码。

重点支持项目的合作研究单位不得超过 2 个，集成项目的合作单位不得超过 4 个。

(4) 申请人在申请书“立项依据与研究内容”部分，应当首先说明申请符合本项目指南中的资助研究方向，以及对解决本重大研究计划核心科学问题、实现本重大研究计划科学目标的贡献。

如果申请人已经承担与本重大研究计划相关的其他科技计划项目，应当在申请书正文的“研究基础与工作条件”部分论述申请项目与其他相关项目的区别与联系。

2. 依托单位应当按照要求完成依托单位承诺、组织申请以及审核申请材料等工作。在 2024 年 11 月 7 日 16 时前通过信息系统逐项确认提交本单位电子申请书及附件材料，并于 11 月 8 日 16 时前在线提交本单位项目申请清单。

3. 其他注意事项。

(1) 为实现重大研究计划总体科学目标和多学科集成，获得资助的项目负责人应当承诺遵守相关数据和资料管理与共享的规定，项目执行过程中应关注与本重大研究计划其他项目之间的相互支撑关系。

(2) 重点支持项目研究成果要在电磁能装备上得到验证，集成项目必须要与电磁能装备相关企业或科研院所联合申报。

(3) 为加强项目的学术交流，促进项目集群的形成和多学科交叉与集成，本重大研究计划将每年举办 1 次资助项目的年度学术交流会，并将不定期地组织相关领域的学术研讨会。获资助项目负责人有义务参加本重大研究计划指导专家组和管理工作组所组织的上述学术交流活动，并把相关成果在指定的装备平台按照实际工况进行考核。

(四) 咨询方式。

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学五处

联系电话：010-62328301