

## 附件 4

# “高端功能与智能材料”重点专项 2021 年度项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“高端功能与智能材料”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2021 年度项目申报指南。

本重点专项的总体目标是：以国家重大需求为导向，支撑新一代信息技术、智能制造、新能源、现代交通、深海/深空/深地探测等重要领域的发展，补短板与建优势并举，解决高端功能与智能材料的重大基础原理、核心制备技术与工程化应用等关键问题。

2021 年度指南部署坚持问题导向、分步实施、重点突出的原则，围绕先进能源材料、关键医用与防疫材料、高端分离膜及催化材料、机敏/仿生/超材料、特种与前沿功能材料和材料基因工程应用技术 6 个技术方向。按照“基础前沿技术、共性关键技术、示范应用”三个层面，拟启动 35 个项目，拟安排国拨经费 6.59 亿元。其中，拟部署 6 个青年科学家项目，拟安排国拨经费 1800 万元，每个项目 300 万元。

项目统一按指南二级标题（如 1.1）的研究方向申报。每个项目拟支持数为 1~2 项，实施周期不超过 4 年。申报项目的研究内容必须涵盖二级标题下指南所列的全部研究内容和考核指标。基

基础研究项目下设课题数不超过 4 个，参与单位总数不超过 6 家；共性关键技术和典型应用示范项目下设课题数不超过 5 个，参与单位总数不超过 10 家。项目设 1 名项目负责人，项目中每个课题设 1 名课题负责人。

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 名项目负责人，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1981 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。

指南中“拟支持数为 1~2 项”是指：在同一研究方向下，当出现申报项目评审结果前两位评价相近、技术路线明显不同的情况时，可同时支持这 2 个项目。2 个项目将采取分两个阶段支持的方式。第一阶段完成后将对 2 个项目执行情况进行评估，根据评估结果确定后续支持方式。

## **1. 先进能源材料**

### **1.1 新一代钙钛矿太阳能电池关键材料及宏量制备技术（共性关键技术）**

研究内容：面向新一代钙钛矿太阳能电池实际应用的需求，研制高稳定、高效率、高均一性、低成本钙钛矿材料，发展高纯度钙钛矿晶体的绿色无污染宏量化制备技术，解决无废料高产率原料合成、可控高速结晶及分离纯化等难题；开发均匀薄膜制备及稳定性技术，围绕兆瓦级钙钛矿太阳能电池中试生产，发展组件封装技术，实现材料性能迭代提升。

考核指标：围绕兆瓦级钙钛矿太阳能电池，研制的单一模组面积不小于  $1\text{m}^2$ ，基于宏量钙钛矿材料，小批量组件样品数  $\geq 10$ ，光电转换效率不低于 18%，效率差异小于 1%；组件户外稳定发电记录不少于 1 年，性能衰减小于 5%，峰瓦成本低于硅基太阳能电池；形成不少于 2 吨的高纯钙钛矿晶体材料产业化能力。

## 1.2 高性能高温超导材料及磁储能应用（示范应用）

研究内容：面向电力系统快速功率补偿和补偿电压瞬时跌落应用需求，建立超导磁储能装备中不同磁场强度部件用超导材料体系，开发高均匀  $\text{MgB}_2$  和 Bi 系前驱粉末的喷雾热分解批量制备、超导线材多芯陶瓷粉末/金属复合体塑性变形控制、高压热处理技术；突破 YBCO 长带涂层结构优化、磁通钉扎控制、快速沉积技术，全面提高超导带材载流能力、机械与电磁性能；基于国产超导材料，开发超导集束缆线成缆技术，研制大容量超导储能用高载流缆线；研究基于新型集束缆线的环形超导储能磁体电—磁—热—力多场耦合分析、结构设计与制造技术；研究超导磁储能系统接入技术及控制策略，解决 10MJ 级超导磁储能系统集成与应用技术，完成并网试验验证。

考核指标：建成单根长度大于千米、年产 300 千米的超导线材生产线，三类线材的性能分别达到： $\text{MgB}_2$  线材，4.2K、3T 下临界电流密度达到  $1000\text{A}/\text{mm}^2$ ；Bi 系线材，4.2K、20T 下临界电流密度达到  $1200\text{A}/\text{mm}^2$ ；YBCO 线材，77K、自场下临界电流密度大于  $20000\text{A}/\text{mm}^2$ 。超导储能磁体储能量不小于 10MJ，最大输

输出功率不小于 5MW，能量转换效率达到 90%，完成并网试验验证。

### 1.3 高能量密度金属锂基二次电池及其关键材料（共性关键技术）

研究内容：针对新能源汽车、智能电网对高能量密度、本质安全二次电池技术的广泛需求，研究金属锂基二次电池的基础科学问题、关键材料和技术。设计和制备实用新型金属锂基复合负极材料以及与之相适配的环境友好型、低成本高性能固态电解质和高容量正极材料；开展微结构设计调控、界面适配性与改性研究，提升电池电化学性能和稳定性；构筑高能量密度、高安全的金属锂基二次电池。

考核指标：提出金属锂基二次电池电化学性能调控新机制和新理论；开发金属锂基复合负极，比容量  $\geq 2000\text{mAh/g}$ ；固态电解质膜面电阻  $\leq 10\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ ，厚度  $\leq 20\ \mu\text{m}$ ，电化学窗口  $\geq 4.8\text{V}$ ；正极材料比容量  $\geq 215\text{mAh/g}$ ，可逆循环 2500 次后容量保持率  $\geq 80\%$ ；单体电池能量密度  $\geq 350\text{Wh/kg}$ ，循环寿命  $\geq 2000$  次，10Ah 以上单体满充态通过穿钉测试（不着火，不爆炸），安全性达到现行国标要求。

### 1.4 高效高安全储运氢关键材料开发及应用（示范应用）

研究内容：面向氢能产业发展的重大需求，针对氢储运效率低等技术瓶颈，开发运氢能效高、安全便捷、长服役寿命的新型储氢材料及其制备技术，突破材料规模化制备和均一性、高安全、高效储运氢系统集成等关键技术，开展储运氢工程示范。

考核指标：高温型储氢材料的重量储氢密度  $\geq 6.0\text{wt}\%$ 、体积

储氢密度 $>75\text{kg H}_2/\text{m}^3$ 、放氢温度 $\leq 250^\circ\text{C}$ 、工作压力 $\leq 2.0\text{MPa}$ 、循环 2000 次后有效储氢密度 $\geq 4.5\text{wt}\%$ ；低温型材料的有效储氢密度 $\geq 2.5\text{wt}\%$ 、放氢温度 $\leq 50^\circ\text{C}$ 、循环 2000 次后有效储氢密度 $\geq 1.8\text{wt}\%$ ；形成年产百吨级规模能力，合格率 95%以上；建成储氢材料运氢示范工程。

### 1.5 高性能低成本燃料电池膜电极的产业化制备技术（示范应用）

研究内容：面向车用高功率密度的氢燃料电池的需求，研究开发低铂载量的高性能膜电极以及低铂含量合金催化剂、复合质子交换膜的宏量制备技术；围绕膜电极宏量制备关键环节，构建制备工艺—膜电极性能分析与预测模型，实现在线监测、自动控制以及宏量制备技术的迭代提升。

考核指标：膜电极功率密度 $\geq 2.0\text{W}/\text{cm}^2$ ，膜电极寿命 $\geq 10000\text{h}$ （运行时间），膜电极最高工作温度 $\geq 95^\circ\text{C}$ ，原材料全部实现国产化，膜电极成本 $\leq 300$ 元/kW，质子交换膜的离子电导率 $\geq 0.1\text{S}/\text{cm}$ （ $95^\circ\text{C}$ ，60RH%），铂载量 $\leq 0.1\text{g}/\text{kW}$ ，催化剂产能 $\geq 1000\text{kg}/\text{年}$ ，复合质子交换膜产能 $\geq 20$ 万  $\text{m}^2/\text{年}$ ，膜电极产能 $\geq 20$ 万  $\text{m}^2/\text{年}$ ，宏量制备膜电极良品率 $\geq 98\%$ （抽检 10000 片，输出功率偏差 $\leq \pm 8\% @ 0.65\text{V}$ ）。

### 1.6 电力电子装备用关键磁性材料开发及样机研制（共性关键技术）

研究内容：面向电力电子装备的高频、高功率发展需求，开

发平面流铸的核心装备及极薄规格硅钢制备成套工艺技术，研制系列极薄规格无取向硅钢和 6.5%Si 硅钢；开发宽幅超薄高性能软磁合金制备与应用技术；研制电动汽车用大功率、具有高抗偏移能力的无线充电工程样机。

考核指标：建成平面流铸带制备极薄规格硅钢中试线，钢水后工序产线长度、能耗和水耗比传统流程减少 80%以上。采用平面流铸流程开发出厚度 0.05~0.15mm 的无取向硅钢和 6.5%Si 硅钢，其中无取向硅钢  $B_{5000} \geq 1.60\text{T}$ ， $P_{1.0\text{T}/400\text{Hz}} \leq 12\text{W/kg}$ ；6.5%Si 硅钢磁致伸缩  $\leq 0.1 \times 10^{-6}$ ， $B_s \geq 1.80\text{T}$ ， $B_{800} \geq 1.27\text{T}$ ， $P_{1.0\text{T}/400\text{Hz}} \leq 5.85\text{W/kg}$ ， $P_{0.2\text{T}/5000\text{Hz}} \leq 12\text{W/kg}$ ；高性能软磁合金宽度  $\geq 120\text{mm}$ ，厚度  $\leq 0.015\text{mm}$ ，100kHz 下的磁导率  $\mu \geq 20000$ ，损耗  $P_{0.2\text{T}/100\text{kHz}} \leq 160\text{kW/m}^3$ ；无线充电工程样机功率 15~20kW，在横向偏移 200mm 或高度方向偏移 80mm 条件下效率不低于 90%，实现工程应用。

### 1.7 超高储能密度电介质材料及器件（基础前沿技术）

研究内容：针对超高储能密度电介质储能实际应用需求，研究储能电介质材料及器件在交流和脉冲强电场下的极化行为、应力变化、热/电失效等物理过程与其微观组分和结构的关系，建立实现性能提升的理论基础和设计范式；利用材料的熵作为新的调控维度，开发超高储能密度新型高熵电介质材料体系，实现储能性能的大幅提升；发展新型储能电介质材料及其精细微结构的制备技术；研发超高储能密度电容器并研究其在交流和强场下的介

电稳定性和使用寿命，突破传统介质电容器的技术壁垒。

考核指标：发展 3 种以上新型电介质储能材料，其中高熵电介质储能材料不少于 2 种。高熵无机薄膜介质（厚度 0.5~1 $\mu\text{m}$ ）储能密度  $\geq 120 \text{ J/cm}^3$ ，储能效率  $\geq 80\%$ ，稳定工作温度范围：-50~150 $^{\circ}\text{C}$ ，循环寿命  $\geq 10^6$  次；柔性介质薄膜储能密度在 -50~150 $^{\circ}\text{C}$  温度区间储能密度  $\geq 6 \text{ J/cm}^3$ （或在室温  $\geq 40 \text{ J/cm}^3$ ），储能效率  $\geq 80\%$ ，循环寿命  $\geq 10^6$  次；高储能密度大容量多层陶瓷电容器（厚度 0.1~0.2mm）储能密度  $\geq 10 \text{ J/cm}^3$ ，可释放能量效率  $\geq 85\%$ ，工作温度范围：-50~150 $^{\circ}\text{C}$ ， $10^6$  次电循环后储能密度衰减  $< 10\%$ ；研制可实用化电容器模组：电容量  $> 100 \mu\text{F}$ ，储能密度  $> 3 \text{ J/cm}^3$ ，可释放能量效率  $\geq 80\%$ 。

## 2. 关键医用与防疫材料

### 2.1 高性能医用高分子关键材料技术及产业化（示范应用）

研究内容：面向高端医疗器械及医疗防护需求，开发“人工肺”聚 4-甲基 1-戊烯的单体及其中空纤维膜材料、高端药包材用环烯烃（共）聚合物材料、血液净化材料、医疗防护用超高熔指聚丙烯树脂，开发国产化替代的应用技术，进行相关技术标准体系建设。

考核指标：开发 4-甲基-1-戊烯单体制备技术，其转化率  $> 80\%$ ，纯度达到聚合原料要求，产能 1000 吨/年；“人工肺”的中空纤维膜 PMP 材料透光率  $> 92\%$ ，吸水率（%） $< 0.01$ ，热变形温度  $\geq 90^{\circ}\text{C}$ ，熔点 220~240 $^{\circ}\text{C}$ ，密度  $< 0.9$ ，产能 1 吨/年以上；

环烯烃（共）聚合物开环易位聚合单体转化率>95%，氢化转化率>99%，或加成聚合环烯烃插入率>25 mol%，透光率>90%，吸水率（%）<0.01，折射率>1.52，热变形温度>120°C，玻璃化转变温度>130°C，低溶出物及无机杂质<150 ppm，产能100吨/年以上；血液净化用聚砜类材料（聚砜、聚醚砜）的二聚体杂质含量低于1.3%、重均分子量65000±4000 D，分子量分布小于4.5，金属离子等杂质含量满足医用要求，产能3000吨/年以上；形成年产万吨直接聚合法超高熔指聚丙烯树脂示范及应用装置，树脂改性后，MFR≥1500g/10min并实现窄分子量分布（<3.5）、挥发分≤0.1%。上述四种材料满足医用要求，并进行相应的器械应用示范。

## 2.2 骨组织精准适配功能材料及关键技术（共性关键技术）

研究内容：面向因骨质疏松、骨肿瘤、感染等导致的人体骨组织缺损疾病治疗的需求，研发对骨组织功能重建具有生物适配功能的高端无机非金属再生修复材料，突破大尺寸类骨无机非金属材料3D打印关键技术及表面后处理技术，阐明骨长入机制，实现骨组织功能重建。开发融合生物材料、医学影像、计算机模拟、增材制造、人工智能的先进骨组织修复与再生成套技术，发展外场驱动的非侵入性材料，促进无生命材料向具有健全功能组织的转化。

考核指标：获得3~5种无机非金属3D打印新材料，阐明材料和组织相互作用机制及细胞信号通路；研发4~6种电、磁、声、



光、热、力等外场驱动的新材料；3D 打印大尺寸无机非金属材料骨修复体连通气孔率 $>50\%$ ，孔径在  $100\sim 600\ \mu\text{m}$  之间可控调节，压缩强度 $>40\ \text{MPa}$ ，实现大尺寸骨缺损的再生修复；建立术前组织三维重建与手术模型制备、术中手术定位导板与精准修复再生修复材料构建、术后康复材料设计的围手术期骨精准再生修复成套技术；完成骨再生精准修复材料的临床前研究，开展临床试验 20 例以上。

### 2.3 生物大分子药物输送载体材料（共性关键技术）

研究内容：针对感染、肿瘤、心血管等重大疾病的治疗，发展多羟基聚阳离子材料、聚乳酸类高分子材料及其药物载体，递送免疫检查点抗体、抗感染性疾病的治疗性抗体和 siRNA、mRNA、质粒等核酸类生物大分子药物，克服药物递送生物屏障，并研究药物输送载体工程化制备技术，实现高效药物输送和疾病治疗。

考核指标：获得 3~5 种多羟基聚阳离子材料、聚乳酸类药用载体材料，其中 2 种及以上载体材料单批次合成规模 5 公斤以上；聚乳酸类聚合物分散度 $<1.5$ ，催化剂残留量低于临床医用标准；多羟基聚阳离子材料的羟基/胺基比不小于 2，在工作浓度下，溶血阴性；获得 3~5 种基于多羟基聚阳离子材料、聚乳酸类医用材料的生物大分子药物输送载体，药物负载效率 $>95\%$ ，药物含量 $>5\%$ ；建立 2 种以上抗体、核酸类生物大分子药物输送载体规模化制备技术，单批次生产规模 $>1000$  支（单支含药量为单人单次给药量），完成至少 1 种的临床前评价。

## **2.4 基于重大疾病分子诊断的生物材料与探针(共性关键技术)**

研究内容：面向重大传染病、肿瘤、心脑血管等重大疾病的早期检测、动态示踪及可视化监测，研究具有重大疾病微环境刺激响应性或重大疾病标志物靶向能力的聚集诱导发光生物材料，明确构效关系，实现病灶部位和重大疾病标志物的高灵敏、特异性成像与检测；开发基于上述生物材料的便携式定量检测设备。

考核指标：获得 5 种以上用于重大传染病、肿瘤、心脑血管等重大疾病的早期检测、动态示踪及可视化监测的聚集诱导发光生物材料，针对病灶部位成像的敏感性 $>90\%$ ，病灶部位与正常组织的对比信噪比 $>100$ ，针对疾病标志物检测的分析时间 $<20$  分钟，变异系数 $<5\%$ ，对疾病诊断的敏感性 $>80\%$ 、特异性 $>80\%$ ，疾病标志物检测限 $<1\text{ ng/mL}$ ；完成各类疾病不少于 500 例临床样本的检测；研制出 2~3 种基于上述材料的便携式定量检测设备。

## **3. 高端分离膜及催化材料**

### **3.1 混合基质型水处理膜材料规模化制备技术(示范应用)**

研究内容：围绕海水淡化、盐湖资源利用的应用需求，解决无机纳米粒子相与有机高分子材料相界面匹配问题，精准构筑水处理膜微结构和表面性质；研制高通量和高脱盐率的混合基质反渗透膜、一二价离子高分离率的纳滤膜和大通量低盐透正渗透膜，研发规模化的混合基质膜生产线；开发超滤、纳滤、反渗透、正渗透等耦合的多膜法海水淡化、盐湖锂资源提取等工程化应用技术，开展工程应用示范。

考核指标：混合基质型反渗透膜元件性能（32000mg/L NaCl，5.5MPa，25°C）：水通量  $\geq 1.2\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ，盐截留率 $>99.7\%$ ；混合基质纳滤膜元件性能的截留分子量：200~400Da，水通量  $\geq 30\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，一二价离子的分离率大于90%。形成10000支/年8040混合基质膜元件的生产能力、万吨/日的工程应用示范。正渗透膜元件性能（1mol/L NaCl为汲取液，去离子水为原料液，25°C）：水渗透通量  $\geq 10\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 、盐反混通量  $\leq 0.2\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。形成10万  $\text{m}^2$ /年混合基质正渗透膜的生产能力。

### 3.2 高性能混合基质气体分离复合膜规模化制备及应用（共性关键技术）

研究内容：围绕二氧化碳减排和能源气体高效分离的应用需求，开发高  $\text{CO}_2$  分离性能的纳米填料，实现对其形貌、尺寸和气体传输通道的有效调控，提高纳米填料在聚合物基质中的分散性和稳定性；设计混合基质复合膜的规模化生产装置，评价所制膜在多种分离体系下的分离性、均匀性和耐杂质性；开发混合基质膜组件的卷制工艺和用于  $\text{CO}_2$  分离的混合基质膜中试装置。

考核指标：开发出3种以上高性能  $\text{CO}_2$  分离纳米填料，形成混合基质复合膜规模化制备的关键技术，设计出可规模化制备超薄无缺陷混合基质复合膜的生产线并连续制备出幅宽大于1m的膜产品，生产线所制大规模混合基质膜在  $\text{CO}_2/\text{N}_2$ （15/85）、 $\text{CO}_2/\text{CH}_4$ （10/90）和  $\text{CO}_2/\text{H}_2$ （40/60）混合气体体系下测试， $\text{CO}_2$  渗透速率分别  $\geq 1000\text{ GPU}$ 、 $400\text{ GPU}$  和  $300\text{ GPU}$ ，分离因子分别

≥80、60 和 40；利用所制混合基质复合膜批量卷制出工业规模膜组件，单个膜组件的膜面积大于 25m<sup>2</sup>，建成并稳定运行 1000Nm<sup>3</sup>/h 的中试装置，运行考核时间大于 1000h。

### **3.3 抗热震耐高压多孔无机膜制备与应用（共性关键技术）**

研究内容：针对石油化工与核电领域的节能减排及安全生产需求，研究低温原位烧结成型技术和孔结构精准调控技术，开发高性能无机膜规模化制备技术；研究石化行业高温气体净化膜装置及反冲控制技术并实现工业应用；研制射流乳化无机膜技术并在典型反应体系实现工业应用；研究第四代核电燃料系统用耐高压、高精度气体净化膜装置及高效除尘技术并实现工业应用。

考核指标：开发出 3 种以上的无机膜新产品，抗热震温差 ≥800℃，抗折强度 ≥20MPa，形成 5000m<sup>2</sup>/年的高性能无机膜生产能力；建成 1000 Nm<sup>3</sup>/小时的石化行业高温气体净化膜装置，运行温度 >400℃，运行考核时间 >1000 小时，高温气体中粉尘脱除率 >99.9%；形成 200 万吨级以上射流乳化膜反应耦合技术的工艺包，并在重油催化裂化工艺中得以实施，运行考核时间 >1000 小时；建成耐高压、高精度核电燃料系统气体净化膜装置，除尘精度达到 0.3μm，除尘效率 >99.9%，耐压 >8MPa，反冲洗再生次数 3000 次以上，运行考核时间 >1000 小时。

### **3.4 高性能电驱动离子膜制备技术及应用示范（示范应用）**

研究内容：围绕高盐废水减量化、资源化和化工清洁生产等应用需求，研制具有高浓缩性能的电渗析膜材料和高产碱性能的

双极膜材料；研究高性能盐浓缩膜材料规模化制备技术，开发含盐废水的高倍率、低能耗的电渗析浓缩技术；研究高产碱通量、高产碱浓度的双极膜材料规模化制备技术，研究双极膜中间层催化剂流失机理及延寿技术；进行高性能电驱动离子膜的规模化生产及应用示范。

考核指标：形成 10 万  $\text{m}^2$ /年的电渗析膜生产能力，膜片幅宽  $\geq 1.0 \text{ m}$ ，膜电阻  $< 3\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，迁移数  $> 98\%$ ；盐浓缩浓度  $> 21 \text{ wt.}\%$ （NaCl 溶液），盐浓缩能耗  $< 180 \text{ kWh/吨 NaCl}$ ，建成千吨/日的工程应用示范；形成 5 万  $\text{m}^2$ /年的双极膜生产能力，膜片幅宽  $\geq 1.2\text{m}$ ，双极膜初始水解离压降  $\leq 1.2\text{V}$ （电流密度  $100 \text{ mA/cm}^2$ ），连续运行 1000 小时后，水解离压降增加幅度  $\leq 1\%$ ，产碱能力  $\geq 0.2\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$  NaOH，产碱浓度  $\geq 5\text{mol/L}$ ，产碱能耗  $\leq 1500 \text{ kWh/吨 NaOH}$ ，碱转化率  $\geq 85\%$ ；在盐制酸碱等领域建成不小于 500 吨/日的工程应用示范。

### 3.5 面向耐溶剂型复合有机膜制备的关键材料技术（共性关键技术）

研究内容：围绕化工、医药、生物、食品等领域溶剂回收和纯化的应用需求，研制高稳定耐溶剂的聚醚醚酮和含氟类等高分子制膜材料，建立膜材料在溶剂体系中的稳定性评价方法；研究耐溶剂型复合有机膜材料表界面结构调控和制备技术，开发膜组件结构设计及封装关键技术；开发低成本规模化有机膜绿色生产技术。

考核指标：研制出 2 种以上可在有机溶剂体系（烃类、醇类、

酮类、酯类等)中长期稳定运行的有机高分子材料;开发出2种以上耐溶剂有机膜及1种以上新结构膜组件,在溶剂环境中运行考核时间大于两年,膜性能衰减不高于10%;实现制膜材料的规模化生产,满足单条年产量大于10万m<sup>2</sup>制膜生产线的使用量。

### **3.6 重要反应过程催化材料的贵金属减量化关键技术(示范应用)**

研究内容:针对烷烃脱氢、乙炔选择性加氢和氨及胺类化合物、煤基甲酸甲酯、抗生素合成、维生素合成等典型反应过程,研究载体微区晶格限域和晶格诱导等对贵金属分散结构和局域电子结构的调控机制;发展高效、单分散贵金属催化材料结构精准控制方法和宏量制备关键技术;开发贵金属等效减量化、高稳定抗流失的系列单分散负载型催化材料,研究金属间化合物催化材料;开展代表性反应的应用示范。

考核指标:同等活性水平下,贵金属用量比传统催化剂减少20%以上,催化剂成本较传统催化剂降低20%以上,特定目标产物选择性不低于95%;同样工艺条件下,反应周期比传统催化剂延长一倍,贵金属组元流失率降低50%;建立4条年产百吨级催化剂规模化制备装置,在3个以上万吨级典型反应体系过程中完成应用示范。

### **3.7 反应过程强化用结构化催化剂关键技术(示范应用)**

研究内容:针对化工过程中传热、传质限制带来的高能耗、高物耗和高污染等问题,开发以规则整体材料为载体的结构化催

化剂反应强化技术，研制面向苯二酚和己内酰胺高效绿色生产的结构化钛硅分子筛催化剂、面向丙二酸绿色生产的催化—分离—一体化结构化固体酸催化剂，开发相应的固定床反应工艺；研究表面缺陷结构可控的炭基结构化催化剂，发展偏氟乙烯清洁生产新工艺；开展结构化催化剂在苯二酚、己内酰胺、丙二酸等清洁生产中的工业示范。

考核指标：研究出 3 种以上结构化催化剂，完成 1000 小时催化剂性能评价，形成 100m<sup>3</sup>/年的结构化催化剂规模化生产能力；开发出 3 种以上清洁生产新工艺；钛硅分子筛结构化催化剂在 1000 吨/年苯二酚生产装置中实现工程应用，苯酚的转化率 ≥ 85%，在 10 万吨/年己内酰胺水体系氨肟化—溶剂重排装置中实现工程应用，环己酮转化率和环己酮肟选择性均 ≥ 99.9%；结构化固体酸催化剂在 1500 吨/年丙二酸生产装置中实现工程应用，丙二酸收率 > 95%。

#### 4. 机敏/仿生/超材料

##### 4.1 温度—热流—应变敏感材料及传感器研发（共性关键技术）

研究内容：面向航空发动机燃气轮机高温区温度、应变、热流等参数准确测试的迫切需求，研究多层敏感薄膜沉积技术、界面应力调控方法、典型薄膜传感器制造等关键技术，发展与金属结构件一体化集成的薄膜传感器，形成完整的高温薄膜传感器制造方法与技术标准，实现器件应用。

考核指标：在 800~1800°C 温度测量范围内，薄膜温度传感器

塞贝克系数 $>5\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 、响应时间 $\leq 1\text{ms}$ ；应变计最高工作温度 $1000^\circ\text{C}$ 、应变因子 $\text{GF}>2$ 、应变测量范围 $0\sim 800\mu\epsilon$ 、测量误差 $\leq \pm 10\%$ ，响应频率不低于 $1\text{kHz}$ ；薄膜热流计最高工作温度 $1000^\circ\text{C}$ 、灵敏度 $>80\mu\text{V}/(\text{W}/\text{cm}^2)$ 、响应时间 $<0.2\mu\text{s}$ ；传感器总厚度不大于 $0.1\text{mm}$ 。实现对新一代航空发动机典型工件的表面温度、热流、应力参数的准确检测。

#### 4.2 特异性分离和能量转换仿生材料（共性关键技术）

研究内容：面向海水提取锂、铀等战略性资源元素及浓差电池发电技术的需求，发展超浸润乳液分离、元素富集以及能量转换仿生材料及器件，开发仿生微纳孔膜的离子筛分和富集材料，研究基于仿生微纳孔膜渗透能转换器件集成技术及能源转换器件。

考核指标：仿生微纳孔膜材料用于海水提锂及海水提铀，在锂离子初始浓度不高于 $10\text{ppm}$ 的海水中锂吸附量达到 $20\text{mg}/\text{g}$ ，铀吸附量由商用吸附膜的21天 $6\text{mg}/\text{g}$ 提升到 $20\text{mg}/\text{g}$ 。自清洁油水分离功能高分子膜纯水通量 $\geq 3\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$ ，油水乳液分离功能的高性能膜材料将污水含油量自 $1000\text{mg}/\text{L}$ 降至 $5\text{mg}/\text{L}$ 以下，较传统气浮工艺节能 $50\%$ 以上。高浓度梯度电解质体系渗透能转换器件功率密度 $\geq 10\text{W}/\text{m}^2$ 。

#### 4.3 基于电磁模态耦合的新型功能超材料（共性关键技术）

研究内容：面向信息技术、高端技术装备等领域中特定工作频段光源、探测和波导器件的重大需求，开发室温工况的太赫兹二次谐波超材料，实现太赫兹谐波高自由度人工调控；发展基于



超材料光电转换的非制冷、超快红外探测器件；发展基于各向异性激元表面波或表面模的新型低损耗高信息量二维表面波器件，扩展表面波的信息承载能力。

考核指标：太赫兹二次谐波超材料工作频段 0.3~5.0THz，二阶非线性极化率高于 5 nm/V，响应时间小于 1 ns。光电探测超材料器件实现红外波段信号探测，非制冷条件下工作温度不低于 290K。新型低损耗高信息量二维表面波器件工作波段 488~780nm，支持两种不同自旋态的表面波的传播并具有区分两种自旋态的能力，损耗低于 3dB/10 $\mu$ m。

#### 4.4 声学超材料及集成器件（共性关键技术）

研究内容：面向大飞机、高速铁路、新能源汽车、医学成像等应用对振动与噪声控制、声波传输用超材料的重大需求以及高速移动通讯对声学超构器件的需要，开发声学超材料设计技术，发展基于 3D 打印等先进制造手段的声学超材料制备方法，研发具备宽带、全向等优异吸声、隔声特性的声结构功能材料和基于拓扑声学的全固态集成声学器件，实现基于超材料的低频声波定向传输，开发有效提高超声穿透性能并实现高分辨颅脑超声成像的声学超材料。

考核指标：声学超材料在空气介质中设计频带范围 20~800 Hz，设计带宽  $\geq$  200Hz，厚度  $\leq$  30 mm，其中吸声超材料实现设计带宽内吸声系数  $\geq$  0.85、平均值  $\geq$  0.95，隔声超材料在面密度不大于 10kg/m<sup>2</sup> 条件下实现设计带宽内插入损失  $\geq$  20 dB、平均值  $\geq$

30 dB。中频超构声学器件的工作频率  $\geq 100$  MHz，室温品质因子  $Q \geq 10^4$ ，高频超构器件的工作频率  $\geq 3$  GHz，室温品质因子  $Q \geq 5 \times 10^3$ ，滤波器带宽的可设计范围优于 0~3%，带外抑制  $\geq 40$  dB，插入损耗  $\leq 5$  dB。超声成像用超材料的超声穿透效率  $\geq 0.7$ 。

## 5. 特种与前沿功能材料

### 5.1 苛刻环境用润滑密封材料与技术（共性关键技术）

研究内容：针对高端装备服役环境复杂化、工况极端化、核心指标极致化、性能要求功能化等发展趋势，开发耐高温动密封材料技术和高温高载荷防腐蚀润滑技术，研制减摩耐磨耐蚀功能一体化材料和抗辐照耐磨润滑材料，突破苛刻润滑密封设计方法和润滑密封材料可控制备技术，满足高端装备极限设计要求，取得重大工程应用。

考核指标：耐高温动密封材料技术：用于燃油泵和航天发动机，高温  $350^\circ\text{C}$ 、高速（ $30\text{m/s}$ ）、 $5000\text{h}$  近零泄漏，宽温域  $25\sim 1300^\circ\text{C}$  下摩擦系数  $\leq 0.35$ 。减摩耐磨耐蚀功能一体化材料：用于航空发动机，耐盐雾  $\geq 1000\text{h}$ 、宽温域（ $-55\sim 300^\circ\text{C}/-55\sim 650^\circ\text{C}$ ）、摩擦系数  $\leq 0.30$ 。抗辐照耐磨润滑材料：用于反应堆控制系统，经  $10^{21}/\text{m}^2$  粒子辐照，离位损伤  $\leq 5\text{dpa}$ ，摩擦系数  $\leq 0.1$ ，耐磨寿命  $\geq 1 \times 10^7$  转。高温高载荷防腐蚀润滑技术：用于重型直升机等高载荷传动系统，承载能力达参考油 190% 以上、氧化试验（ $175^\circ\text{C}$ ）酸值  $\leq 2\text{mgKOH/g}$ 、与丁腈等密封材料相容，通过海水腐蚀试验。

## 5.2 可反复化学循环生物降解高分子材料（示范应用）

研究内容：针对一次性使用塑料制品废弃后难回收所造成的资源浪费和环境污染问题，研制满足不同力学性能和耐热性能需要的、可实现高效化学回收循环并且可完全生物降解的聚对二氧环己酮（PPDO）、聚己内酯（PCL）、聚左旋丙交酯（PLLA）等高分子材料，突破单体与聚合物的可控绿色合成、高单体选择性的聚合物高效解聚、回收单体的分离纯化等关键技术，开展单体、聚合物合成、聚合物解聚回收单体的中试和示范生产技术研究。

考核指标：形成百吨级 PPDO、千吨级 PCL、万吨级 PLLA 等 3 种生物降解高分子材料的单体与聚合物的合成能力。PPDO：拉伸强度  $\geq 40$  MPa，断裂伸长率  $\geq 400\%$ ，解聚单体回收率  $\geq 95\%$ ，回收单体再聚合 PPDO 特性粘数  $\geq 1.8$  dL/g；PCL：拉伸强度  $\geq 20$  MPa，断裂伸长率  $\geq 500\%$ ，解聚单体回收率  $\geq 95\%$ ，循环回收单体再聚合 PCL 分子量  $\geq 80$  KDa；PLLA：拉伸强度  $\geq 60$  MPa，解聚后左旋丙交酯的回收率  $\geq 95\%$ ，光学纯度  $\geq 98\%$ ，循环回收单体再聚合 PLLA 分子量  $\geq 160$  KDa。由回收单体制备的三种聚合物的生物降解性与原聚合物相同，可全生物降解。

## 5.3 低环境负荷无机胶凝材料（示范应用）

研究内容：面向现代都市、高速交通、重大公共安全设施建设对材料高性能化和低环境负荷的双控需求，以硅酸盐无机胶凝材料全生命周期环境负荷最低为目标开展生态设计，研究材料性能提升与生命周期低环境负荷协同改进模式及其交互作用机理，

开发原料活化、过程强化净化、污染抑制等胶凝材料生产技术，研发低品位/非传统原料活化与有害组分固化/钝化、高温反应过程强化与污染排放抑制、材料应用成型速率调控与性能提升等关键技术，形成材料流程多维管控技术工业应用、材料产品重大基础设施建设示范应用。

考核指标：建立低环境负荷无机胶凝材料生态设计理论方法，开发覆盖产品全生命周期、多维度指标、数据本土化率>90%的设计软件/数据库系统 2 套以上；低品位/非传统原料高温反应活性提高 10%以上，有害组分固化/钝化率 90%以上；熟料综合煤耗<95kgce/t、碳排放<835kgCO<sub>2</sub>/t、NO<sub>x</sub> ≤ 50mg/Nm<sup>3</sup>；综合环境负荷降低 12%以上；熟料强度 60MPa，耐久性能提高 10%，抗氯离子渗透系数（RCM 法）<2.5×10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s，高质服役寿命提升 20%以上；建设产能 500 万吨/年以上的低环境负荷无机胶凝材料工业示范，单条生产线规模不低于 200 万吨/年；形成系列材料工程示范应用 6 项以上。

## 6. 材料基因工程应用技术

### 6.1 数据驱动的新型高性能功能材料智能化研发与应用（共性关键技术）

研究内容：基于数据驱动技术，针对功能材料成分工艺敏感、数据稀疏和高噪音的特点，基于不确定量化分析，发展功能材料数据质量清洗和控制技术，建立评估准则，建设包含不确定分析的典型功能材料高精度专题数据库；发展适用于功能材料的物理

化学描述符，开发基于材料领域知识的功能材料特征参量优化筛选算法，基于因果关系挖掘技术，构建具有物理可解释性的材料特征参量与目标性能的机器学习模型和数学表达；发展基于主动学习的多目标自适应协同优化理论、算法和软件，耦合高通量实验迭代，实现功能材料性能的多目标智能优化；研发材料高通量计算与大数据技术相互融合和迭代的新型功能材料智能设计技术，在能源材料、生物医用材料、催化材料、特种功能材料等研发中进行应用，研发出具有自主知识产权和应用前景的新型高性能功能材料。

考核指标：研发出 3~5 种具有自主知识产权的能源材料、生物医用材料、催化材料、特种功能材料等典型的新型高性能功能材料，相关材料的性能指标均为国际领先水平，1 种以上材料能够替代目前进口产品；形成 3 项以上材料数据质量评估与控制技术和准则；建成材料高通量计算与大数据有机融合的新型功能材料智能设计平台和专题数据库，数据量>100 万条，满足 5 类以上典型功能材料智能设计的需求；形成 3 项以上功能材料特征参量优化筛选方法、多目标优化方法，研发出 3~5 种具有自主知识产权的新型高性能功能材料，1 种以上材料获得应用；申请软件著作权登记不少于 3 件。

## **6.2 新型膜材料的理性设计与集成制备（基础前沿技术）**

研究内容：针对气体分离用膜材料的巨大需求，从材料基因工程理念出发，以 MOF/COF 膜材料为对象，探索新型膜材料 ≥

10<sup>2</sup>级并发式高通量计算，筛选≥10<sup>6</sup>种分离膜材料，实现≥64个/批次组合制备方法等材料基因工程关键技术：结合多层次模拟计算方法，建立膜材料多组元热力学、动力学和结构等数字化数据库；研究基于构筑模块的膜材料高通量组装、膜性能计算和筛选方法；建立新型膜材料的高通量制备与测试表征方法，及组元、结构与制备工艺集成设计方法；发展出具有自主知识产权的新型高效膜材料，面向典型气体分离开展应用示范。

考核指标：建立包含10<sup>6</sup>种以上MOF和COF典型分子结构的数据库；开发每小时可组装出10<sup>5</sup>种以上材料的高速材料构筑算法和高性能筛选模拟方法，实现≥10<sup>2</sup>级的并发式高通量计算，形成基于材料基因工程的新型膜材料设计系统与计算机软件；开发≥64个/批次MOF/COF膜材料的高通量制备技术平台，针对CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>、烯烃/烷烃等典型气体环境分离，进行验证性应用；开发1~2类膜气体渗透速率≥10<sup>3</sup>GPU级，CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>分离因子≥5的新型MOF/COF膜材料；申请软件著作权登记不少于3件。

### 6.3 基于材料基因工程的多铁性材料的性能调控（共性关键技术）

研究内容：面向信息存储领域对多铁性材料的巨大需求，利用材料基因工程的先进理念、方法和技术，探索多铁性序参量从相互排斥到相互融合的可能方案；深入研究多铁性材料中多重序参量共存、耦合与竞争的微观机理，探索由此诱发多铁性的新原理、发现新材料；发展用于多铁性材料性能预报与设计的高通量

计算模型和方法，显著增强铁电性、磁性与磁电耦合效应；发展多铁性材料快速合成与制备技术，制备各类结构与成分可控的强磁电耦合多铁性新材料及其异质结，并对其结构和多场耦合性能进行精确表征；阐明多铁性在外场中的演化和调控机制，构筑基于新材料的原型器件。

考核指标：突破 2 项以上多铁性新材料设计和制备的新原理、新方法和新技术，研究出 2~3 个（近）室温强磁电耦合单相多铁性材料新体系；揭示多铁性材料中铁性序参数共存的微观机制，设计出不少于 2 种具有拓扑磁电畴的多铁性异质结构；构筑超低功耗（ $<0.01\text{pJ/bit}$ ）、快速处理（ $<10\text{ns}$ ）的多态非易失存算一体新原型器件；申请软件著作权登记不少于 2 件。

#### **6.4 可控应变率加载功能梯度材料的高通量设计与动态评价技术（共性关键技术）**

研究内容：针对重大工程对增强关键材料在多应变率载荷下服役过程中的可靠性和安全性等重大需求，开展功能梯度材料的组元体系设计与筛选，确定材料密度、波阻抗以及弹性常数等的变化范围；构建功能梯度材料设计参数的数据库；阐明材料波阻抗分布与加载应变率之间的关联以及实现可控应变率加载功能的物理机制；实现功能梯度材料实现可控应变率加载功能的高通量设计；建立面向典型可控应变率加载功能梯度材料的高通量实验评价技术。针对重大工程对增强关键材料在多应变率载荷下服役过程中的可靠性和安全性等重大需求，开展功能梯度材料的各组

元体系及其多物性参量的高通量计算，构建功能梯度材料设计参数的数据库；开展多材料体系、宽组成范围梯度材料加载过程的仿真模拟与高通量设计，阐明材料波阻抗分布与加载应变率之间的关联以及实现可控应变率加载功能的物理机制；开展面向典型可控应变率加载功能梯度材料的高通量评价研究，建立可控应变率加载实验技术。

考核指标：建立多材料体系、宽组成范围、可控应变率加载功能梯度材料设计参数的数据库；构建功能梯度材料的高通量、多尺度计算平台，实现 $\geq 10^2$ 级的并发式高通量计算；研制3~5种具有可控应变率加载功能的梯度材料并且材料前后端材料的密度倍差 $\geq 10^2$ ，最低密度小于 $0.15 \text{ g/cm}^3$ ；建立应变率范围为 $10^4\sim 10^6/\text{s}$ ，加载应力达到 $100\text{GPa}$ 量级的可控应变率加载高通量评价技术；申请软件著作权登记不少于3件。

## 7. 青年科学家项目

### 7.1 新型高密度储氢材料

研究内容：针对金属氢化物热力学和动力学制约，探索基于多策略改性的新型制备技术和新机制、新理论，发展高密度储氢材料新体系；研究新体系下的材料组成、维度、晶型、形貌与材料吸/放氢热力学和动力学性能的关系，掌握相应调控方法。

考核指标：提出2~3种改善储氢性能新策略、新理论，发展出2~3种储氢材料新体系，2~5种新型储氢材料，其可逆容量比现有体系提高30%以上。



## 7.2 限域传质效应的分离与催化材料设计制备

研究内容：研究分子、离子等在特定纳微结构中的超常行为，突破分离材料的选择性和渗透性相互博弈的瓶颈；研究具有有限域效应的分离、催化材料微结构形成机理及调变规律；研究分子结构设计与调控、微结构的多层次调控和优化方法；构建适合水、离子、气体分子等传递通道，开发原创性的分离膜材料、单原子催化专用制备技术。

考核指标：发展出变革性分离膜材料，分离性能呈现倍增效益，形成限域传质分离膜应用范例；或发展出单原子催化材料，催化性能极大提升，形成单原子催化应用范例。

支持项目数：2 项

## 7.3 航空燃油用聚结分离材料及其装置研究

研究内容：针对航空喷气燃料聚结分离用关键材料，解决滤材在低界面张力、水滴粒径小、流量大的条件下航空喷气燃料中水滴难以分离的难题，研究航空喷气燃料添加剂对水滴聚结性能及材料润湿性能的影响，开发聚结分离关键材料的结构设计方法，研制高效率、高纳污容量的聚结分离关键材料及工程化制备技术和聚结分离装置。

考核指标：聚结分离装置的纳污容量  $\geq 1.43 \text{ g}/(\text{L}/\text{min}$  额定流量)，滤后燃料的洁净度指标：游离水含量  $< 15 \text{ mg}/\text{L}$ ，固体杂质含量  $< 0.26 \text{ mg}/\text{L}$ ，纤维含量  $< 10 \text{ 根}/\text{L}$ 。

## 7.4 熵调控合金新材料及其微纳结构设计

研究内容：针对抗震防灾安全监控和生物医用领域对高灵敏

度传感材料的需求,发展基于成分和原子堆垛结构的熵调控方法,研究熵对应力阻抗效应、电化学活性、生物相容性、微纳形貌形成过程的影响规律和机制,研制熵调控合金传感材料,构筑多形态、多层次微纳拓扑形貌,探索熵调控合金材料在安全监控和生物传感器中的应用。

考核指标: 开发出 3~5 种熵调控合金材料, 构型熵可调范围  $\geq 5 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ; 100MPa 下应力阻抗比  $\geq 100\%$ ; 单层级拓扑形貌的特征尺寸在 10nm~10 $\mu\text{m}$  范围内可调, 多层次拓扑形貌的骨架  $\geq 5\mu\text{m}$ 、孔径  $\leq 15\text{nm}$ , 比表面积  $\geq 50\text{m}^2/\text{g}$ , 电化学或光学检测灵敏度比无微纳拓扑形貌的同成分熵调控合金提高 5 倍以上。

支持项目数: 2 项