

“先进结构与复合材料”重点专项 2021年度项目申报指南建议 (征求意见稿)

国家重点研发计划启动实施“先进结构与复合材料”重点专项。本重点专项总体目标是：面向制造强国、交通强国、航天强国建设等国家重大需求部署先进结构与复合材料研发任务，形成国产材料体系化自主研制和保障能力，实现航空发动机、重载火箭、国产大飞机、核电工程装备、深海油气资源开采等国家大型工程急需的关键结构与复合材料的国内自主供给。

根据本重点专项工作部署，现提出2021年度项目申报指南建议。2021年度指南部署遵循“基础研究、共性关键技术、典型应用示范”全链条创新设计、一体化组织实施原则，拟围绕高性能高分子材料及其复合材料、高温与特种金属结构材料、轻质高强金属及其复合材料、先进结构陶瓷与陶瓷基复合材料、先进工程结构材料、结构材料制备加工与评价新技术、基于材料基因工程的结构与复合材料7个技术方向，启动46个指南任务。

1. 高性能高分子材料及其复合材料

1.1 高性能全芳香族纤维系列化与规模化制备关键技术 (共性关键技术)

研究内容：针对航空航天、武器装备等亟需的高强高韧结构材料应用需求，开展高性能全芳香族纤维制备关键技术及其应用研究。揭示大分子刚性链结构、纤维纺丝成型、凝聚态及其性能之间的内在规律，攻克全芳香族纤维制备共性科学问题；研究高强/高模芳纶纤维成型和热处理工艺，突破制备关键制备技术及成套装备；研究高伸长耐高温芳纶 III 纤维、芳纶纸及其蜂窝应用技术；探讨高性能液晶纺丝聚芳酯聚合物结构设计、固态缩聚反应动力学和纤维冷却成型机理，攻克聚芳酯纤维制备关键技术。

考核指标：对位芳纶：高强型纤维强度 ≥ 23 cN/dtex、模量 ≥ 580 cN/dtex、建成产能 4000 吨/年的生产示范线，高模型纤维强度 ≥ 21 cN/dtex、模量 ≥ 850 cN/dtex、建成产能 3000 吨/年的生产示范线；芳纶 III 纤维强度 ≥ 28 cN/dtex、模量 ≥ 800 cN/dtex、伸长率 $\geq 3.0\%$ ，芳纶 III 纸纵向抗张强度 ≥ 1.8 KN/m、拉伸模量 ≥ 2000 MPa，芳纶 III 蜂窝 250°C 强度保持率 $\geq 60\%$ ；聚芳酯纤维：纤维单丝纤度 ≤ 5 dtex，强度 ≥ 25 cN/dtex，最大纤维强度 ≥ 30 cN/dtex，模量 ≥ 500 cN/dtex，最大模量 ≥ 650 cN/dtex，极限氧指数 $\geq 29\%$ ，建成产能 200 吨/年的生产示范线。

1.2 吸音蜂窝复合材料及在商用航空发动机上的应用

（典型应用示范）

研究内容：针对商用航空发动机降噪和减重的迫切需求，开展声学隔膜材料研制和制膜工艺研究、吸音芳纶蜂窝高效制备技术和自动化装备研究、组元体系（预浸料、蜂窝、声

学膜、胶膜等)匹配研究、发动机短舱复合材料消音结构声学设计研究、复合材料消音结构高效成型和制孔研究及消音结构检测评估研究,突破吸音蜂窝复合材料及应用的关键技术,形成材料和工艺规范,完成在典型短舱消音结构上的应用验证。

技术指标: 声学膜: 声阻抗 30~300rayl (厚度 0.05~2.00mm); 吸音蜂窝: 密度不低于 48kg/m³、公差±8%, 孔格尺寸 9.6mm, 公差±8%, 稳定压缩强度≥1.72MPa, L 方向剪切强度≥1.07MPa, W 方向剪切强度≥0.58MPa, 滚筒剥离强度≥13 N·mm/mm, 声学膜植入效率达到 8 个/分; 短舱结构: 消音微孔孔径公差±0.2mm, 孔间距公差±0.4, 制孔速度不低于 12 个/min; 短舱产品: 通过发动机试车验证, 与原结构相比降噪≥1.6dB, 减重≥15%。

1.3 面向高端应用的阻燃高分子材料关键技术开发 (共性关键技术)

研究内容: 面向 5G 通讯和轨道交通等高端制造业的需求, 形成一批具有国际领先水平和自主知识产权的合成树脂材料及应用技术。重点开发 PCB 的高阻燃、高 T_g、低介电性能的环氧树脂; 热塑性弹性体 TPE 专用无卤膨胀阻燃技术及应用; 反应型硅磷阻燃剂制备及其在聚碳酸酯、聚脲弹性体应用开发; 研发本征阻燃不熔滴聚酯和反应型阻燃尼龙 66 工程化制备及其应用, 完成规模化生产与应用示范。

考核指标: 各种材料的阻燃达到 UL94V-0, 其中 PCB 材料, D_k < 4.0, D_f < 0.008, T_g > 170°C; 聚烯烃弹性体断裂伸

长率 $\geq 400\%$ ；聚碳酸酯阻燃等级 UL94 5VA(厚度 1.5mm)，建成百吨级聚脲弹性体生产线，阻燃 LOI $\geq 28\%$ ，断裂伸长率 $\geq 350\%$ ；本征阻燃聚酯 Tg $\geq 85^{\circ}\text{C}$ ，拉伸强度 $\geq 85\text{MPa}$ ，炭化不熔滴；本征阻燃尼龙 66 阻燃单体 $< 4\%$ ，拉伸强度 $\geq 60\text{MPa}$ ，LOI $> 30\%$ 。

1.4 低成本生物基工程塑料的制备与产业化（共性关键技术）

研究内容：面向生物基高分子材料成本高和高性能工程塑料牌号少的问题，集中开发低成本生物基呋喃二甲酸（FDCA）、异山梨糖醇的制备技术；开发 1,4-环己烷二甲醇（CHDM）的国产化制备技术，基于新型单体开发生物基聚酯 PEF、PCF 和 PETG 等三类高性能聚酯，从单体、聚合物到后端应用全链条研究。精细调控产品结构，研究产品的耐高温性能、力学性能、阻隔性能等，开发不低于 10 种高性能聚酯产品，并在下游得到应用。

考核指标：呋喃二甲酸的产品纯度 $\geq 99.5\%$ ，吨级成本低于 2 万元，完成千吨级中试示范；CHDM 纯度 $\geq 99.9\%$ ；PEF 的力学强度 $\geq 75\text{MPa}$ ，玻璃化转变温度 $\geq 80^{\circ}\text{C}$ ，建立万吨级产业化生产线。基于 CHDM 开发低成本 PCF、PETG 以及与呋喃二甲酸的生物基聚酯，产品的成本低于 2 万元/吨，拉伸强度 $\geq 80\text{MPa}$ ，拉伸模量 $\geq 2.5\text{GPa}$ 。开发不低于 6 个牌号的新产品，实现聚酯的千吨级稳定生产。

2. 高温与特种金属结构材料

2.1 低成本高纯粉末高温合金研制及应用（共性关键技

术)

研究内容: 针对先进商用航空发动机关键热端承力转动部件高使用温度、长服役寿命、低制造成本的要求, 研究新一代高纯、低成本氩气雾化粉末高温合金及其制备技术, 发展合金成分优化、纯净氩气雾化制粉、返回料粗粉循环利用、高纯净粉末处理、全封闭真空等温锻造等新方法, 突破高温合金纯净熔炼及成分调控、返回料重熔和纯净度控制、氩气雾化粉末氧含量控制、全真空封闭等温锻造等关键制备技术, 掌握粉末纯净度、返回料粗粉再利用、氧含量等对粉末高温合金组织和性能的影响规律, 研制出具有高强抗蠕变损伤容限特征且满足使用要求的粉末高温合金涡轮盘工程试验件。

考核指标: 高温合金粗粉末(粒径 $>53\mu\text{m}$)返回料添加比例 $\geq 30\%$, 细于 $53\mu\text{m}$ 粉末收得率 $\geq 70\%$; 氩气雾化粉末非金属夹杂物 ≤ 10 颗/kg, 粉末高温合金氧含量 $\leq 100\text{ppm}$; 制备的锻件直径 $\geq 600\text{mm}$, 锻件超声检验缺陷灵敏度 $\leq \Phi 0.4-15\text{dB}$, 锻件 830°C 抗拉强度 $\geq 940\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 830\text{MPa}$ 、 $830^\circ\text{C}/330\text{MPa}/50\text{h}$ 蠕变残余应变 $\leq 0.2\%$; 低成本粉末高温合金 650°C 抗拉强度 $\geq 1400\text{MPa}$ 、屈服强度 $910-1110\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 12\%$, $700^\circ\text{C}/690\text{MPa}/68\text{h}$ 蠕变残余应变 $\leq 0.2\%$, $650^\circ\text{C}/R_t=0.05/\Delta\varepsilon_t=0.008$ 低周疲劳周次 >5000 ; 建成年产800吨的低成本高纯度高温合金粉末示范线。

2.2 高温合金纯净化与难变形薄壁异形锻件制备技术 (共性关键技术)

研究内容: 针对国产高温合金冶金质量差、材料综合利

用率低、力学性能波动大等问题，研究镍基高温合金纯净熔炼、返回料处理和再利用技术，返回料与全新料混合重熔工艺；开发难变形高温合金成分优化及纯净熔炼、铸锭均匀化热处理、合金铸锭均质开坯、棒料细晶锻制、大型薄壁异形环形件整体制备等工艺技术，建立合金工艺与成分、组织和性能的影响关系，实现高温合金棒材和锻件组织均匀性和性能一致性的优化控制，完成合金制备工艺、材料与构件质量评估及在先进能源动力装备的考核验证。

考核指标：按照 40%以上的添加比例与全新料混合熔炼后，母合金铸锭化学成分和力学性能达到全新料水平，高温合金 O、N、S 总含量 $\leq 30\text{ppm}$ 、45 种痕量元素总含量 $\leq 200\text{ppm}$ ；环形锻件晶粒度 4 级或更细，各部位极差不超过 2 级；锻件环向不同位置硬度差值 $\leq 28\text{HB}$ ，不同批次锻件之间硬度差值 $\leq 42\text{HB}$ ；锻件室温拉伸强度 $\geq 1210\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 15\%$ ， 760°C 拉伸强度 $\geq 850\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 25\%$ ， $730^\circ\text{C}/550\text{MPa}$ 持久时间 ≥ 23 小时；精密异形环锻件外径尺寸 1500~2500mm、高度 700~1000mm、壁厚 25~70mm，材料利用率较现有技术提升 30%以上。

2.3 高品质 TiAl 合金粉末制备及增材制造关键技术（共性关键技术）

研究内容：针对电子束增材制造所需的低氧含量球形 TiAl 合金粉末，研究铝元素挥发、粉末球形度差、空心粉高问题，突破工业化生产球形 TiAl 合金粉末和工业化 TiAl 构件增材制造关键技术；开展增材制造 TiAl 合金的材料-工艺-

组织-缺陷-性能一体化系统研究及典型服役性能测试，突破构件增材制造工艺及性能控制关键技术，掌握包括材料、工艺、组织调控、性能特征及典型应用，为新一代航空发动机高温关键构件制造及工业化应用提供技术支撑。

考核指标：粉末指标：粉末粒度 $45\mu\text{m}\sim 105\mu\text{m}$ ，收得率 $\geq 40\%$ ，粉末氧含量 $\leq 0.075\text{wt}\%$ ，粉末流动性 $\leq 35\text{s}/50\text{g}$ ；成形件指标：室温抗拉强度 $\geq 600\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 1.5\%$ ， 650°C 抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ ， 650°C 高周疲劳强度 (σ_{-1} , $K_t=1$, $N=1\times 10^7$) $\geq 300\text{MPa}$ ， 650°C 持久强度 ($\sigma_{100\text{h}}$) $\geq 250\text{MPa}$ 。

2.4 630-650°C超超临界汽轮机用关键耐热材料与部件研制（共性关键技术）

研究内容：针对 630°C 和 650°C 超超临界国家示范工程汽轮机转子和高温气缸需求，研究 630°C 超超临界汽轮机转子用新型马氏体耐热钢成分、40吨级钢锭高纯均质冶炼技术、基于物理冶金原理的热成型和热处理技术；研究 650°C 超超临界汽轮机转子和气缸用新型镍基耐热合金成分、1~20吨级合金锭高纯均质冶炼技术、基于物理冶金原理的热成型和热处理技术；研究上述新型耐热材料的高温长时组织稳定性及其主要影响因素；研究上述新型耐热材料的抗蒸汽腐蚀性能及其主要影响因素。

考核指标：由40吨级钢锭制造的新型马氏体耐热钢转子锻件按ASME规范 630°C 外推10万小时持久强度不低于 100MPa ，抗蒸汽腐蚀性能与FB2相当；由12~20吨级合金锭制造的新型镍基耐热合金转子锻件和高温气缸按ASME

规范 650°C 外推 10 万小时持久强度不低于 100MPa，抗蒸汽腐蚀性能与 In617 相当；上述新型耐热材料及其部件制造技术形成自主知识产权。

2.5 光热发电用耐高温熔盐特种合金研制与应用（典型应用示范）

研究内容：针对太阳能光热发电产业低成本高效发电可持续发展需求，以下一代低成本高效超临界二氧化碳光热发电系统中耐高温氯化物混合熔盐特种金属材料及其制造技术为研究对象，研究耐高温不锈钢、高温合金板材及其焊接界面在高温氯化物、硝酸盐中的腐蚀机理和服役寿命预测技术，研究满足氯化物和硝酸盐熔盐发电系统用的耐高温不锈钢、高温合金板材成分和组织设计及其批量制造技术，开发耐高温熔盐不锈钢、高温合金成型和焊接行为及其先进制备技术，发展高温合金长寿命高吸收率吸热涂层，实现高性能不锈钢、高温合金产品开发及应用示范。

考核指标：耐高温不锈钢、高温合金板材耐熔盐腐蚀性能达到国际先进水平（满足行业标准要求），不锈钢在 800°C 氯化物、600°C 硝酸盐中的腐蚀速率 $< 0.1\text{mpy}$ ，高温合金在 800°C 氯化物、600°C 硝酸盐中的腐蚀速率 $< 0.05\text{mpy}$ ；形成耐高温氯化物熔盐的不锈钢和高温合金设计与板材先进制造技术，高温合金板材涂层吸收率 > 0.96 ；形成万吨级以上耐高温熔盐不锈钢板材、百吨级耐高温熔盐高温合金板材研发和生产能力，在光热发电系统中获得示范应用。

2.6 海洋工程及船用高端铜合金材料（共性关键技术）

研究内容：针对舰船和海洋装备泵体、管路及阀门等耐腐蚀性差、服役寿命短、高端材料依靠进口的问题，研究海洋工程及船用新型高性能铜合金材料设计、成分-组织-工艺内禀关系、腐蚀行为及耐蚀机理，开发耐高流速海水冲刷型铜合金承压铸件制备、超大口径耐蚀铜合金管材加工及管附件成形、海洋油气开采用高耐磨高耐蚀铜合金管棒材加工及热处理组织性能调控等高质量低成本工业化制造技术，开展产品应用技术研究，实现高端铜合金典型产品示范应用。

考核指标：耐高流速海水冲刷铜合金铸件室温抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 16\%$ ，5m/s海水冲刷腐蚀速率 $\leq 0.05\text{mm/年}$ ；超大口径耐蚀铜合金管材及管附件最大外径 $\geq 500\text{mm}$ ，室温抗拉强度 $\geq 350\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 30\%$ ，3.5m/s海水冲刷腐蚀速率 $\leq 0.20\text{mm/年}$ ；高耐磨高耐蚀铜合金管材室温抗拉强度 $\geq 1100\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 3\%$ 、HRC硬度 ≥ 34 ，相同腐蚀试验条件下均匀腐蚀速率不高于进口C72900材料水平；形成铸件500吨/年、管材及管附件5000吨/年的工业化规模生产能力。

3. 轻质高强金属及其复合材料

3.1 苛刻环境能源井钻采用高性能钛合金管材研究开发及应用（典型应用示范）

研究内容：针对我国油气、可燃冰等能源钻采高耐蚀和轻量化的紧迫需求，研究苛刻环境下高强韧耐蚀钛合金多相组织强韧化、抗疲劳机理，以及高温、高压、腐蚀、疲劳等服役环境下材料失效机理；建立服役环境适应性材料设计方

法及油气井钻采用钛合金钻杆、油套管服役性能评价方法；开发高性能大规格钛合金无缝管材成套工艺技术及关键应用技术；制定专用标准规范，开展苛刻服役条件下应用研究，实现工业化规模稳定生产，在典型应用场景实现示范应用。

考核指标：钛合金油套管最大直径/厚度/长度 $\geq\phi 270\text{mm}/15\text{mm}/10\text{m}$ ，钻杆最大直径/厚度/长度 $\geq\phi 140\text{mm}/10\text{mm}/8\text{m}$ ；屈服强度 $\geq 900\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 12\%$ 、冲击功 $A_{kv}\geq 50\text{J}$ ；钻杆全尺寸实物弯曲疲劳寿命 $\geq 10^7$ 次；环境条件下（ 160°C 、 Cl^- 离子浓度大于 $1.2\times 10^5\text{ppm}$ 、 H_2S 分压达到 3MPa 、 CO_2 分压达到 5MPa ），均匀腐蚀速率不高于 0.025mm/a ，不产生点蚀、应力腐蚀开裂和缝隙腐蚀；钛合金耐磨涂层实物的工况磨损率 $< 10\%/100\text{h}$ ；完成3种以上典型规格高强韧耐蚀钛合金管材的全尺寸实物验证试验；连接螺纹结构满足石油天然气工业特种管材技术规范要求；形成标准和技术规范2项以上；实现2种以上典型工况的现场示范应用。

3.2 船艇与深远海工程耐蚀可焊中高强铝合金（典型应用示范）

研究内容：针对现代舰船、海洋工程及先进轨道交通等重大工程面临的复杂海洋、大气腐蚀环境中多种损伤载荷问题，研发铝合金复合微合金化技术，通过与铝基体电极电位匹配的超常稳定弥散相强化，实现均衡界面、有序结构为组织特征的新型耐蚀抗损伤铝合金，开展船用耐蚀铝合金全生命周期环境负荷评估，设计开发出具有我国自主知识产权

的耐蚀可焊铝合金宽幅板、带筋壁板、低环境负荷等新型铝合金关键技术，促进传统铝合金工业技术进步，实现替代进口及后续自主技术创新，满足重大工程应用的迫切需求。

考核指标：耐剥落腐蚀均 EA 级以上；长期接触海水耐蚀可焊高强板材宽度 $\geq 2000\text{mm}$ 、屈服强度 $\geq 300\text{MPa}$ 、焊接系数 0.7、抗疲劳裂纹扩展速率 $da/dN \leq 2 \times 10^{-3}\text{mm/cyc}$ 、碳排放比船用 5083 合金减少 10%、建设 10000 吨/年生产线、在船舶等应用；长期接触海水整体挤压壁板宽度 $\geq 1600\text{mm}$ 、屈服强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、焊接系数 0.8、抗疲劳裂纹扩展速率 $da/dN \leq 2 \times 10^{-3}\text{mm/cyc}$ ；超高强耐蚀大规格结构件外径 $\geq 350\text{mm}$ 、屈服强度 $\geq 500\text{MPa}$ 、焊接系数 0.7；高强耐蚀铝合金，屈服强度 $\geq 350\text{MPa}$ 、焊接系数 0.8、疲劳强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、建设 10000 吨/年生产线，应用于海洋平台等。

3.3 先进铝合金高效加工及高综合性能研究（共性关键技术）

研究内容：针对飞行器、船舶以及汽车等提速减重、绿色制造的迫切需求，开展以铸代锻、整体成型、短流程、低排放的高效加工技术研究，研发高综合性能的先进铝合金材料；开展先进铝合金材料综合性能评价及加工技术效能评价，形成铸锻一体成型的新型高综合性能铝合金高效加工技术，将铸造、增材制造等铝合金提升到变形铝合金强度水平。

考核指标：铸锻一体成型高强铝合金屈服强度 $> 350\text{MPa}$ 、延伸率 $> 6\%$ 、碳排放比 A356 合金减少 10%，建设 10000 吨/年生产线，示范应用于汽车、通讯等；高强传动连接铝合金

材料，抗拉强度 $\geq 450\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 400\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 8\%$ 、疲劳强度 $\geq 300\text{MPa}$ 、焊接系数达到 0.85、满足高强传动连接部件需求、建设 10000 吨/年生产线、示范应用于汽车等；核电超高强铝合金管材外径 150mm、壁厚 3.5mm、抗拉强度 $\geq 650\text{MPa}$ 、满足应用要求；高强铝合金增材制造产品屈服强度 $\geq 400\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 6\%$ 、疲劳强度 $\geq 200\text{MPa}$ 、建立 1000 吨/年生产线。

3.4 高性能镁合金大型铸/锻件成形与应用（共性关键技术）

研究内容：针对商用车、高速列车、航空航天等领域的轻量化紧迫需求，探索热-力耦合条件下大容积镁合金凝固与形变过程中成分-组织-性能演变规律与调控技术，开发适合于大型铸/锻件的高性能镁合金材料；研究大型镁合金铸/锻件组织均匀化与缺陷调控机理，开发高致密度铸造成形技术、大体积熔体清洁传输及半连续铸造技术、挤锻复合一体成形技术；开展大型承载件的结构设计、产品制造、腐蚀防护及使役性能评价等技术研究，并实现示范验证与规模化应用。

考核指标：开发 1 类既适合铸造又适合锻造的高性能镁合金材料，压铸件实体抗拉强度 $\geq 300\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 180\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 8\%$ 、最大投影面积 $\geq 1\text{m}^2$ ；锻件实体主变形方向抗拉强度 $\geq 470\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 350\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 10\%$ ，其余方向抗拉强度 $\geq 420\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 8\%$ ，长度 $\geq 1.2\text{m}$ ，最大重量 $\geq 350\text{kg}$ ；大型压铸件内部孔隙率低于 3%，大锻件探伤质量优于 A 级；大型铸锻件表面处理后耐中性盐雾腐蚀 $\geq 2000\text{h}$ ，膜层均匀性

±5μm；实现 2 种以上大型镁合金铸/锻件在商用卡车、高速列车等上的考核验证和示范应用，形成镁合金大型铸/锻件 20 万件/年的工业化规模生产能力。

3.5 新型结构功能一体化镁合金变形加工材制造技术 (共性关键技术)

研究内容：针对航空航天、轨道交通、能源采掘、电子通信等重大装备升级换代的紧迫需求，研究新型强化相对镁合金力学性能与功能特性的协同调控机理，发展新型结构功能一体化镁合金材料与新型非对称加工技术，开发大规格高强阻尼镁合金环件、宽幅阻燃镁合金型材、高强可溶镁合金管材、高强电磁屏蔽/高导热镁合金板材的工业化制造成套技术及关键应用技术，并实现典型示范应用。

考核指标：高强阻尼镁合金环件直径≥3000mm、抗拉强度≥420MPa、延伸率≥6%、比阻尼系数≥20%，阻燃镁合金型材宽度≥450mm、抗拉强度≥310MPa、延伸率≥10%、燃点≥800℃，高强可溶镁合金管材抗拉强度≥450MPa、延伸率≥5%、溶解速率≥60mg/(cm²·h)，高强电磁屏蔽/高导热镁合金板材宽度≥800mm、抗拉强度≥350MPa、延伸率≥8%、屏蔽效能≥80dB/热导率≥125W/(m·K)，形成结构功能一体化镁合金变形材 15000 吨/年和新型可溶镁合金加工材 5000 吨/年的工业化规模生产能力，实现 3 种以上结构功能一体化镁合金材料在航空航天、轨道交通、能源采掘、电子通信等重大装备上的示范应用。

3.6 极端环境特种服役构件用构型化金属基复合材料

（典型应用示范）

研究内容：针对航空航天特种服役构件用耐热高强韧钛基复合材料以及岛礁建设与隧道掘进等重大工程用高耐磨陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料，探索其材料体系-复合构型设计-复合技术-宏微观性能耦合机制与协同精确控制机理，开发跨尺度分级复合构型的定位控制、界面效应与组织精确调控、性能及质量稳定性控制、低成本批量制备等产业化关键技术，开展特种服役性能评价、全寿命预测评估与应用技术研究，建立相关标准规范，实现其稳定化生产与应用示范。

考核指标：耐热、高强韧构型化钛基复合材料室温抗拉强度 $\geq 1200\text{MPa}$ 、伸长率 $\geq 7\%$ ， 700°C 持久时间较基体钛合金提高 30 倍以上， 750°C 抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ ；高耐磨构型设计钢铁基复合材料的基体材料抗拉强度 $\geq 900\text{MPa}$ 、硬度 $\text{HRC}\geq 60$ 、冲击韧性 $\geq 10\text{J}/\text{cm}^2$ ，复合层厚度 5~100mm 可调，使用寿命较相应基体提高 3 倍以上，复合构件重量规格可覆盖 10~10000 公斤、壁厚规格可覆盖 10~300mm，项目实施期间产值超过 10 亿；开发出极端环境特种服役构件用构型化金属基复合材料典型产品的工业化制造成套技术与装备，并在飞行器耐热/承载关重件以及岛礁建设与隧道掘进等重大工程用耐磨构件上实现批量示范应用。

3.7 高端装备用高强轻质、高强高导金属层状复合材料研制及应用（典型应用示范）

研究内容：针对高速列车、先进飞机、防护车辆等高端装备轻量化、高性能化的迫切需求，研究高性能多层铝合金

板材、铜包铝合金等层状复合材料界面结构与复合机理，探索应用人工智能、大数据等前沿技术优化界面调控的理论与方法，阐明铝合金复合板材的叠层结构、复合界面、陶瓷颗粒第二相等在高应变速率下抵抗冲击的作用机理；开发防护车辆、特种装备等用抗冲击多层高强铝合金复合板材的工业化制造成套技术及复合板材的性能评价等关键应用技术；开发高速列车、航空航天、电力电器等高端装备用铜包铝合金复合材料短流程高效工业化生产成套技术及多场景应用关键技术，制定专用标准规范，实现在高端装备上的示范应用。

考核指标：多层铝合金复合板材抗拉强度 $\geq 580\text{MPa}$ ，规定塑性延伸强度 $\geq 530\text{MPa}$ ，断后伸长率 $\geq 8\%$ ，界面剪切强度 $\geq 90\text{MPa}$ ，高应变速率下（ $5.0 \times 10^3/\text{s}$ ）的抗冲击强度比 7A52 铝合金板材提高 30%以上，形成多层铝合金复合板材 1 万吨/年的工业化规模生产能力。铜包铝合金加工态抗拉强度 $\geq 350\text{MPa}$ 、断后伸长率 $\geq 3\%$ ，退火态抗拉强度 $\geq 220\text{MPa}$ ，断后伸长率 $\geq 20\%$ ，界面剪切强度 $\geq 50\text{MPa}$ ，电导率 $\geq 66\% \text{IACS}$ ，形成铜包铝合金复合材料产品 2 万吨/年的工业化规模生产能力。

4. 先进结构陶瓷与陶瓷基复合材料

4.1 光刻机高端装备用精密结构陶瓷部件研制与应用

（共性关键技术）

研究内容：针对光刻机高端装备对精密结构陶瓷材料的应用需求，研究大尺寸复杂形状精密结构陶瓷部件的近净尺寸成型（形）与低应力微变形高温烧结技术；开发大尺寸复

杂形状结构陶瓷部件的高可靠连接与高精度加工技术；实现光刻机等高端装备用大尺寸复杂形状结构陶瓷典型部件的研制与应用示范。

考核指标：实现光刻机用大尺寸运动工件台陶瓷部件、大行程陶瓷导轨部件、高精密多孔陶瓷真空吸盘的研制与应用示范；运动工件台陶瓷部件尺寸 $\geq 2\text{m} \times 1.4\text{m}$ ，平面度 $\leq 5\mu\text{m}$ ；陶瓷导轨部件长度 $\geq 2.5\text{m}$ ，直线度 $\leq 5\mu\text{m}$ ；真空吸盘部件直径 $\geq 400\text{mm}$ ，孔隙率 35~45%，平均孔径尺寸 2~3 μm ；建立研制平台，具备小批量生产能力，在 2 台光刻机中实现精密陶瓷部件的“全国产化”集成应用。

4.2 400km/h 高速列车用碳陶（C/C-SiC）制动盘及配对闸片关键技术（共性关键技术）

研究内容：针对 400km/h 高速列车应用需求，研究高导热高强韧性碳陶（C/C-SiC）复合材料制动盘承载与摩擦功能一体化设计及其近尺寸制备技术；开发碳陶制动盘与钢质车轮/盘毂高温紧固连接技术；开发碳陶制动盘配对闸片材料配方及闸片结构与制备技术；开展碳陶制动盘及其配对闸片 1:1 台架试验及其失效评价方法研究，建立 400~450km/h 高速列车碳陶制动盘及配对闸片的技术标准。

考核指标：碳陶复合材料密度 $\leq 2.5\text{g/cm}^3$ ，抗压强度 $\geq 180\text{MPa}$ ，抗弯强度 $\geq 120\text{MPa}$ ，可抗 25g 时速 600km/h 石头冲击。碳陶制动盘满足《动车组制动盘暂行技术条件》（TJ/CL310-2014）要求，轮盘（外径 750mm、盘厚 46.5mm） $\leq 45\text{Kg}$ ，轴盘（外径 640mm、盘厚 80mm） $\leq 35\text{Kg}$ ，比钢盘

减重 60%以上; 闸片满足《动车组闸片暂行技术条件》(TJ/CL 307-2019) 要求, 磨耗量 $\leq 0.35 \text{ cm}^3/\text{MJ}$; 碳陶制动盘与配对闸片的使用寿命比目前高铁使用的制动盘/闸片提高 30%以上。初速度 400km/h 时, 紧急制动距离 $\leq 10500\text{m}$, 摩擦系数 ≥ 0.32 , 制动盘表面平均温度 $\leq 900^\circ\text{C}$; 满足我国 400~450km/h 高速列车装车使用要求, 形成 10000 套/年批量化生产供应能力。

4.3 高端合金制造及钢铁冶金用关键结构陶瓷材料开发及应用 (典型应用示范)

研究内容: 面向冶金产业提升的发展需求, 研究高端合金制造及钢铁新技术领域用关键结构陶瓷材料组分设计与制备技术, 开发高品质高温合金制备用结构陶瓷材料、冶金领域用高效节能硼化锆陶瓷电极、薄带连铸用结构功能一体化陶瓷材料的规模化生产工艺, 开展应用评价技术研究, 建立规模化生产线, 研制关键生产设备, 制定制备及检测标准。

关键指标: 高品质高温合金制备用结构陶瓷的应用使高温合金纯净度达到国际领先水平, 与同类普通材料相比, 关键性能指标上提高 50%以上 (含), 使用寿命提高 30%以上 (含); 高效节能硼化锆陶瓷电极的常温弯曲强度 $\geq 300\text{MPa}$, 耐 2000°C 高温氧化, 电阻率 $15\sim 200\mu\Omega\cdot\text{cm}$, 连续使用寿命 1 年以上, 节电效率 $\geq 15\%$; 陶瓷侧封材料热导率 $\leq 20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 热膨胀系数 $\leq 3\times 10^{-6}/\text{K}$, 使用温度 $\geq 1800^\circ\text{C}$, 常温弯曲强度 $\geq 150\text{MPa}$, 高温 ($1400^\circ\text{C}/0.5\text{h}$) 弯曲强度 $\geq 30\text{MPa}$, 杨氏模量 $\geq 70\text{GPa}$, 表面加工精度不低于 $\pm 1\mu\text{m}$, 总体使用寿命 6 小时

以上，实现稳定高效批量化制备。

4.4 低面密度空间轻量化碳化硅光学-结构一体化构件制备（基础研究）

研究内容：针对空间遥感光学系统的应用需求，研究低面密度空间轻量化碳化硅光学-结构一体化构件的结构拓扑设计，开展复杂形状碳化硅构件的增材制造等新技术、新工艺研究，开发低面密度复杂形状碳化硅构件的近净尺寸成型与致密化烧结技术，开展低面密度碳化硅空间轻量化碳化硅光学-结构一体化构件的光学加工与环境模拟试验研究，实现满足空间遥感光学成像要求的低面密度碳化硅光学-结构一体化构件材料制备。

考核指标：碳化硅陶瓷材料开口气孔率 $\leq 0.5\%$ ，弹性模量 $\geq 350\text{GPa}$ ，弯曲强度 $\geq 350\text{MPa}$ ，热膨胀系数 $2.1\pm 0.15\cdot 10^{-6}/\text{K}$ （@ $-50\sim 50^\circ\text{C}$ ），热导率 $\geq 160\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；光学-结构一体化构件尺寸 $\geq 500\text{mm}$ ，面密度 $\leq 25\text{kg}/\text{m}^2$ ，表面粗糙度 $R_a\leq 1\text{nm}$ ，面形精度 $\text{RMS}\leq \lambda/40$ （ $\lambda=632.8\text{nm}$ ）， $500\sim 800\text{nm}$ 可见光波段平均反射率 $\geq 96\%$ ， $3\sim 5\mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\mu\text{m}$ 红外波段平均反射率 $\geq 97\%$ ；通过空间成像光学系统环境模拟试验考核（包含时效稳定性、热真空、力学振动等试验，面形精度 $\text{RMS}\leq \lambda/40$ ）。

4.5 高性能硅氧基纤维及制品的结构设计与产业化关键技术（典型应用示范）

研究内容：针对高效隔热防护服、高强芯片、高保真通讯电缆等对高性能硅氧基纤维及制品的应用需求，研究硅氧前驱体化学组成、结构重组、多级微纳结构演变对纤维成型

的影响规律，突破硅氧基无机制品高温均匀化熔制技术，开发高强玻璃纤维；研究前驱体分子缩聚和纳米/微米多级孔组装结构演变对孔结构形成的影响规律，突破多孔玻璃纤维常温挤出成型技术，开发低介电、低热导、轻质柔性玻璃纤维；研究微重力、高真空环境下玄武岩材料熔制技术及深空环境对纤维成型的作用机制，开发高性能玄武岩纤维；开展高性能玻璃纤维及制品产业化示范，形成千吨级生产线；开发极端环境的模块化玄武岩纤维成型装置，实现微重力下自主成纤和近地轨道中试。

考核指标：高强度玻璃纤维：纤维单丝强度 ≥ 4.6 GPa，浸胶纱强度 ≥ 3.2 GPa，模量 ≥ 82 GPa，热膨胀系数 $\leq 5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，中空纤维率 $\leq 10 \times 10^{-6}$ 。深空玄武岩纤维：微重力(< 0.3 g)、低压(< 1 kPa)下制备玄武岩纤维强度 ≥ 2.0 GPa，模量 ≥ 90 GPa，实现近地空间中试。低介电、低热导、轻质柔性玻璃纤维制品：介电常数 < 2.0 ，介电损耗正切 $< 8 \times 10^{-4}$ ，热导率 < 0.026 W/(m.K)，密度 < 0.5 g/cm³。建成 1 条千吨级/年军民两用高性能玻璃纤维及制品生产线，设计建造 1 套极端环境玄武岩纤维模块化装备自动实验装置，实现应用示范。

5. 先进工程结构材料

5.1 川藏铁路用长寿化轨道用钢研制与应用（典型应用示范）

研究内容：针对川藏铁路重点工程对轨道关键零部件使用寿命的重大需求，研究川藏铁路复杂服役条件下铁路轨道（包括钢轨和辙叉）磨损、腐蚀和疲劳破坏机理及性能退变

规律；研发长寿命高强度钢轨新钢种及制造关键技术；研发长寿命辙叉用新钢种及制造关键技术；研发新型辙叉制造关键技术；研发新型高强度钢轨间及其与新型辙叉间焊接关键技术；开展应用与评价体系研究，编制产品标准和应用设计规范。

考核指标：钢轨新产品抗拉强度 $\geq 980\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 12\%$ 、 -40°C 低温断裂韧性 $\geq 35\text{MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$ ，与现有 U71Mn 热轧钢轨相比，相对耐蚀性提高 50%以上，滚动接触疲劳寿命提高 30%以上。新型辙叉钢抗拉强度 $\geq 950\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 450\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 50\%$ 、室温 $A_{ku}\geq 200\text{J}$ 、 -40°C 下 $A_{ku}\geq 118\text{J}$ ，新型辙叉钢的耐磨性能、耐潮湿环境腐蚀性能和抗疲劳性能比普通铸造高锰钢均提高 50%以上。钢轨间焊接接头性能满足 TB/T 1632.1-2014 标准要求；钢轨与辙叉间焊接接头满足实际使用要求。研制新技术、新产品 4 项，申请发明专利 10 件以上，编制相关标准或技术规范 2 项以上，实现钢轨和辙叉示范应用 2 项以上。

5.2 川藏铁路桥梁用大吨位碳纤维复合材料拉索（共性关键技术）

研究内容：针对川藏高原铁路桥梁建设对高性能与长寿命拉索的需求，研发耐严酷环境与抗疲劳的拉索用碳纤维复合材料体系，开展大吨位、自监测碳纤维复合材料拉索的索体设计方法与制备技术研究；研发大吨位、长寿命与高锚具效率的碳纤维复合材料索体的锚固体系；研究大吨位碳纤维复合材料拉索关键服役性能（包括抗疲劳、耐久、抗冲击、

抗火等)的评价与控制方法;开展碳纤维复合材料拉索用于悬索桥吊杆、斜拉桥拉索或预应力筋混凝土梁等工程结构的应用技术体系研究,开展工程示范应用。

考核指标:形成川藏高原铁路桥梁用 1000 吨级以上大吨位碳纤维复合材料索体与配套锚固体系的设计方法与制备技术;碳纤维复合材料拉索满足 1000 小时冻融循环与湿热老化后疲劳循环 200 万次要求,以及循环次数为 50 次的周期荷载试验要求;自监测技术监测服役碳纤维复合材料拉索的全长应变演化,测点长度分布密度 $\leq 1\text{m}$,应变精度 $\leq 10\mu\epsilon$;锚固体系的锚具效率系数 ≥ 0.9 ;川藏高原恶劣环境下碳纤维复合材料索体及锚固体系的服役寿命预期超过 50 年;编制碳纤维复合材料拉索产品标准 1 部,索体性能评价方法的规范或标准 1 部;申请发明专利 10 件以上;实现碳纤维复合材料拉索工程示范应用 1 项。

5.3 川藏铁路复杂环境结构混凝土关键材料与应用(典型应用示范)

研究内容:针对川藏铁路复杂环境对高性能结构混凝土的需求,研究高围岩等级隧道单层衬砌混凝土和高地热、大温差环境下二次衬砌机制砂混凝土收缩开裂机理,大温差、强紫外、低湿干燥环境下桥梁混凝土长期变形性能;开发川藏铁路工程混凝土专用低热硅酸盐水泥,隧道混凝土用速凝早强材料、水化温升调控材料与原位增韧材料等,及桥梁混凝土用基体减缩材料与表层防护材料等;研究结构混凝土裂缝控制成套技术,建立相关标准规范,实现工程示范应用。

考核指标：川藏铁路专用低热水泥熟料 $C_2S \geq 40\%$ ，3d 水化热 $\leq 220 \text{kJ/kg}$ ，28d 抗折强度 $\geq 8.0 \text{MPa}$ ，28d 干燥收缩率 $\leq 0.08\%$ ；隧道单层衬砌混凝土 6h 抗压强度 $\geq 10 \text{MPa}$ ，24h 抗压强度 $\geq 20 \text{MPa}$ ，28d 干燥收缩率 $\leq 0.02\%$ ，喷射回弹率 $\leq 10\%$ ； 30°C 下 24h 水化热降低率 $\geq 50\%$ ，隧道二次衬砌混凝土水化温升降低 $\geq 15\%$ ，收缩率降低 $\geq 50\%$ ，基体拉压比提升 $\geq 30\%$ ，不开裂保证率 $\geq 95\%$ ；桥梁混凝土 90d 徐变度 $\leq 20 \times 10^{-6} / \text{MPa}$ ，7d 干燥收缩率 $\leq 0.01\%$ ，28d 干燥收缩率 $\leq 0.025\%$ ，表层防护材料导热系数 $\leq 0.04 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，太阳光反射率 $\geq 93\%$ ，水蒸气透过率 $\leq 0.2 \text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ；研制新技术、新产品 5 项，申请发明专利 20 件以上，编制相关标准或技术规范 3 项以上。

5.4 海洋建筑结构用耐蚀钢及防护技术（共性关键技术）

研究内容：针对海洋建筑结构对长寿命钢铁材料的需求，研究高盐雾、高湿热、强辐射、高 Cl⁻ 等严酷海洋环境下钢铁结构材料的失效机理；开展免维护海洋结构用低合金耐蚀钢板及复合钢板的成分设计及制备技术研究；开展防腐涂层设计与制备技术、钢板与涂层耦合耐蚀机理研究；研究低成本耐蚀钢筋母材与覆层协同耐蚀机制与制备技术；开展耐蚀钢连接技术研究；建立复杂海洋环境钢材及构件的服役评价及全寿命周期预测方法。

考核指标：海洋结构用钢 $R_{el} \geq 345 \text{MPa}$ ， $R_m \geq 490 \text{MPa}$ ， $A \geq 20\%$ ， $-20^\circ\text{C AKv} \geq 100 \text{J}$ ，钢板防护涂层主要指标应高于 GB/T 18593 要求 20% 以上，满足不同环境下 30 年免维护要求；耐蚀钢筋 $R_{el} \geq 500 \text{MPa}$ ，均匀延伸率 $A_{gt} \geq 7.5\%$ ，典型海

水海砂环境下耐蚀性能较传统钢筋提升 6 倍以上；形成严酷海洋环境下钢材产品评价标准和设计指南或规范 2 件以上，申请发明专利 10 件以上，实现工程示范应用 2 项。

6. 结构材料制备加工与评价新技术

6.1 金刚石超硬复合材料制品增材制造技术与应用示范 (典型应用示范)

研究内容：围绕深海/深井勘探与页岩气开采、高端芯片制造等国家重大工程对长寿命、高速、高精度超硬材料制品的需求，开展高性能金刚石刀具、磨具和钻具等结构设计和增材制造技术研究，结合新型金刚石超硬复合材料工具宏观外形和微观异质结构的理论设计和数值模拟，重点突破增材制造用超硬复合材料金属粉体关键制备技术和含超硬颗粒的多材料增材制造关键技术，完成典型工况条件下服役性能的评价。

技术指标：切/磨削类制品在典型工况条件下磨耗比降低 70%以上，耐热性达到 800°C 以上，使用寿命是现有加工材料的 2 倍以上；钻具类制品抗弯强度 $\geq 2000\text{MPa}$ ，冲击韧性 $\geq 4\text{J/cm}^2$ ，努氏硬度（压痕）达到 50GPa，使用寿命达到 YG15 (WC-15Co) 类硬质合金的 5 倍以上；形成年产百万件的工业化生产能力，实现 2~3 种产品的规模应用。

6.2 高强轻质金属结构材料精密注射成形技术（共性关键技术）

研究内容：针对 5G 基站、消费电子、无人机或机器人等领域对高强轻质结构零件的迫切需求，研究粉末冶金高强

轻质金属结构材料及其注射成形工艺过程精确控制原理与方法、小型复杂构件精密成形、低残留粘结剂设计及杂质元素控制、强化烧结致密化及合金的强韧化。重点突破粉末冶金高强轻质钢设计及其粉末制备、低成本近球形钛合金微细粉末制备、可烧结高强粉末冶金铝合金及近球形微细粉末制备、组织性能精确调控等关键技术，实现高强轻质金属复杂形状制品的稳定化宏量生产。

考核指标： 高强轻质钢密度 $\leq 6.2\text{g/cm}^3$ ，屈服强度 $\geq 1000\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 5\%$ ；低成本钛合金粉末（ $D_{50} \leq 10\mu\text{m}$ ），成本降低 50%以上，合金屈服强度 $\geq 900\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 7\%$ ；高强铝合金密度 $\leq 3\text{g/cm}^3$ ，屈服强度 $\geq 550\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 5\%$ ；标准试件精度 $\pm 0.1\%$ ；形成年产 1000 吨的工业化生产能力。

6.3 大型复杂薄壁高端金属铸件智能液态精密成型技术与应用（共性关键技术）

研究内容： 面向大涵道比涡扇航空发动机、新能源汽车等对超大型复杂薄壁高端金属铸件的需求，打破传统“经验+试错法”研发模式，探索基于集成计算材料工程、大数据与人工智能相结合的金属铸件智能液态精密成型关键技术。研究超大型复杂薄壁金属铸件凝固过程的组织演变与缺陷形成机理，建立多物理场耦合作用下铸件组织与缺陷的预测模型，发展数据驱动的材料综合性能与铸造工艺多因素智能化寻优方法，形成金属铸件智能液态精密成型数字孪生模型及系统。

考核指标： 开发超大型复杂薄壁高端金属铸件液态精密

成型仿真分析专用软件 1 套，实现多物理场耦合分析的并行计算求解和铸造缺陷高精度预测，计算网格规模可支持 200 亿以上。开发智能液态精密成型数字孪生体与数字孪生系统 1 套，计算实时精度不低于 95%，实现铸造工艺智能优化与铸件质量智能控制。在不少于 2 类超大型复杂薄壁高端金属铸件制造中进行验证应用，铸件的最大尺寸 ≥ 1700 mm，最小壁厚 2~4 mm，尺寸公差达到 DCTG6，气孔/缩松缺陷低于 3%，铸造成品率 90%。

6.4 复杂工况下冶金领域关键部件表面工程技术与应用 (典型应用示范)

研究内容：针对冶金领域高温、重载、高磨损等复杂工况对关键部件表面防护技术的迫切需求，开展复合增强表面工程材料及涂镀层结构的理性设计，开发复合镀、超高速激光熔敷、冷喷涂、堆焊等相结合的复合表面工程技术，攻克复杂工况下冶金领域关键部件表面耐高温、耐磨损、抗疲劳涂镀层制备的关键技术，开展其服役性能评价和寿命预测，并应用于挤压芯棒、结晶器、除鳞辊等典型部件，在大型钢铁冶金企业得到示范应用。

考核指标：开发无缝钢管挤压芯棒、结晶器、除鳞辊等三种典型件表面制造的专用复合粉末 3 种以上，涂层结合力 ≥ 100 MPa，综合使用寿命提升 40%以上；挤压芯棒的耐磨性比 H13 钢提高 2 倍以上，表面润滑镀层摩擦磨损性能比传统镀层提升 20%以上；除鳞辊的硬质相质量比 $\geq 60\%$ ，粘结相硬度 HRC ≥ 38 ，无裂纹；铜结晶器修复层晶粒度 < 10 μm ，可

修复厚度 $\geq 6\text{mm}$ ；表面强化涂层孔隙率 $< 1\%$ ，修复及强化后变形量 $\leq 2\text{mm/m}$ ，单套结晶器过钢量 10 万吨以上。

7. 基于材料基因工程的结构与复合材料

7.1 结构材料多时空大尺寸跨尺度高通量表征技术（基础研究）

研究内容：针对高温合金、轻合金和高性能复合材料等的工程化需求，基于先进电子、离子、光子和中子光源，集成多场原位实验与多平台关联分析技术，研发晶粒、组成相、相界面、化学元素、晶体缺陷与织构的多时空跨尺度高通量表征、智能分析与快速评价技术，研发大尺寸多尺度组织结构和宏微观力学性能高通量表征技术与试验装备，实现典型工程化结构材料制备、加工和服役过程中内部组织结构的动态演化和交互作用规律的高效研究，建立材料成分-组织-性能的多尺度统计映射关系与定量模型，在典型结构材料的改性、工艺优化和服役评价等方面得到实际应用。

考核指标：建立多场耦合条件下晶粒、组成相、相界面、化学元素、晶体缺陷与织构的多维多尺度高通量表征技术与系统 ≥ 3 项，维度 ≥ 4 维，空间尺度范围覆盖亚埃至厘米尺度，主要技术参量深度耦合；建立大尺寸多尺度组织结构和宏微观力学性能高通量表征技术与试验装备 ≥ 2 项，指导行业龙头企业实现 3 种以上产品全流程的高通量表征与快速服役评价，实现产品核心性能和工艺的显著优化。申请发明专利 3~5 项，软件著作权登记 3~5 项，形成高通量表征技术和服役评价标准或规范 3 项。

7.2 金属结构材料和构件服役行为智能化高效评价与工程应用（共性关键技术）

研究内容：针对金属结构材料腐蚀、疲劳、蠕变等服役性能评价耗时长、成本高的问题，通过多物理场耦合、宏微观多尺度损伤建模，融合智能传感、信号处理、机器学习等现代技术，研发材料服役性能物理实验与模拟仿真实时交互和数字孪生的智能化高效评价技术和装置；研究金属结构材料数据虚实映射与数据交互规则，建立数据关联平台，加速材料服役性能数据的积累，形成关键金属结构材料和构件完整性评价数据系统；集成结构模型与损伤模型，发展基于大数据技术的金属结构材料服役安全评价和寿命预测的新技术和新方法，并实际应用到重大工程领域。

考核指标：研发出金属结构材料服役性能参数实时监测和数据采集的新型智能传感器 2 种以上；建立材料服役性能评价物理空间与数字空间加速模拟之间的多维度映射和数字孪生关系，研发出满足时效性的金属结构材料服役性能表征参量建模和模拟方法 3 种以上，满足 3 种以上耦合环境的模拟，评价效率提升 2 倍以上；申请发明专利 5~8 项；在长输管线和能源装备等重大工程领域进行示范应用。

7.3 基于材料基因工程的新型高温涂层优化设计研发（共性关键技术）

研究内容：针对海上动力装备用热端部件及其海洋腐蚀环境，发展高温涂层的高通量制备技术，开展新型高性能高温涂层成分和组织结构的高通量实验筛选和优化研究；研发

涂层-基体界面结构和性能多尺度高效模拟设计和预测技术，研发涂层高温力学性能、界面强度、残余应力和高温腐蚀性能等的高通量实验技术，开展涂层与界面性能和工艺优化研究；综合利用材料基因工程关键技术，研发出具有重要工程应用前景的新型超高温、耐腐蚀涂层。

考核指标：研发出不少于 3 套针对涂层的高温力学性能高通量测试技术和装置，测试温度不低于 1600℃，满足高温力学性能、界面强度和残余应力等多种力学性能的测试，测试效率提高 30%以上；研发出涂层-基体结构和性能多尺度高效模拟预测模型和技术，模型预测值与实际测试值偏差 $\leq 15\%$ ；综合利用材料基因工程技术，研发出 3 种以上新型高性能涂层材料，服役温度提高 100℃以上，1200℃循环氧化达到完全抗氧化级，综合性能满足工程应用需求；申请发明专利 10 项以上，国际标准 3 项以上。

7.4 高强韧金属基复合材料高通量近净形制备与应用 (共性关键技术)

研究内容：针对航空航天领域高强韧金属基复合材料应用需求，围绕非连续增强金属基复合材料强韧性失配及复杂构件成形加工周期长、成本高、材料利用率低的突出问题，结合材料基因工程思想和近净形制备技术原理，研发铝基、钛基复合材料高通量近净形制备技术及其高通量表征技术；测试和采集基体与不同增强相界面物理化学数据，建立不同基体/增强相界面热力学和动力学物性数据库；研究铝基、钛基复合材料成分-构型-工艺-界面-性能交互关联集成计算技

术，实现材料体系与构型及其近净形制备工艺方案与参数的高效同步优化，并在航空航天等领域得到工程示范应用。

考核指标：构建成分-构型-工艺-界面-性能关系设计平台及多尺度模拟平台，实现 100 种以上复合材料构型的模型高效创建与计算；高通量近净形制备和表征技术能力 ≥ 200 样品数/批次；构型化复合材料断裂韧性比均匀复合材料提升 $\geq 30\%$ ，晶须增强型与颗粒增强型铝基复合材料的弹性模量比基体提高 50%与 150%以上，钛基复合材料承温能力提高 200°C 以上；复杂构件近净形制备技术的材料利用率提高 3~5 倍，制造周期及生产成本“双减半”；在航空航天等领域实现 10 个以上典型应用；申请发明专利 20 项以上。

7.5 先进制造流程生产汽车用钢集成设计与工程应用 (典型应用示范)

研究内容：鉴于钢铁工业绿色制造、生态发展对先进制造流程生产高端钢铁材料的迫切需求，基于材料基因工程的思想，针对近终形流程生产汽车用钢，采用多场耦合和跨尺度计算技术，集成材料开发与产品应用的跨尺度计算模型，构建一体化集成计算平台，建立材料基础数据和工艺、产品数据库，开发基于数据挖掘和强化机制的组织性能定量关系模型，实现产品成分-工艺-组织-性能的精准预报；开展在近终形流程生产汽车用钢的示范应用，研制出代表性产品并实现工程应用。

考核指标：针对近终形流程生产汽车用钢，开发出成分-工艺-组织-性能关系的跨尺度（ $10^{-3}\sim 10^3\text{ mm}$ ）模型，构建出

全流程一体化集成计算平台，关键工序的组织结构模拟与产品性能预报误差 $\leq 10\%$ ；建成材料、工艺、产品等复杂异构有机融合的数据库，数据量大于 50 万条；研发出 2 种汽车用钢，在典型近终形流程上实现千吨级生产，研发成本和周期降低 35%；申请发明专利或软件著作权 10 件以上。

7.6 增材制造专用高性能高温合金集成设计与制备（基础研究）

研究内容：针对航空发动机、高超声速飞行器、重载火箭等国家大型工程等所需高温合金精密构件服役特点和增材制造物理冶金特点，融合多层次跨尺度计算方法、并行算法和数据传递技术，发展增材制造专用高性能高温合金的高效计算设计方法与增材制造全流程模拟仿真技术，结合高通量制备技术和快速表征技术，建立增材制造专用高性能高温合金的材料基因工程专用数据库；结合机器学习、数据挖掘、可视化模拟等技术，开展增材制造专用高温合金高效设计与全流程工艺优化的研究工作，实现先进高温合金高端精密构件的组织与尺寸精密化控制，并在航空航天等领域得到工程示范应用。

考核指标：针对国家大型工程等所需高温合金精密构件特点，研制出 3~5 种增材制造专用高温合金，研发周期缩减 40%以上、研发成本降低 40%以上；发展高端增材制造装备和工艺配套的高温合金材料和技术体系，实现国产化规模应用，综合性能平均提升 20%以上，产品成本降低 30%以上，核心性能指标、批次稳定性达到国际先进水平；申请发明专

利或软件著作权 10 件以上。

7.7 极端服役条件用轻质耐高温部件高通量评价与优化设计（共性关键技术）

研究内容：发展基于大数据分析和数据挖掘的高温钛合金、钛铝金属间化合物等轻质耐高温部件组织结构与疲劳、蠕变等关键性能的定量预测模型；研制实时瞬态衍射、原位成像表征装置，发展三维无损检测高效分析技术；研究高温腐蚀环境下组织结构演化和性能退化机理、高温和循环载荷等多因素耦合作用下的损伤累积及高通量评价与寿命预测技术；基于极端环境服役性能需求，利用机器学习和数据挖掘技术，实现轻质耐高温材料的成分、组织、制备工艺、服役性能的高效优化，并在航空、航天、核能等领域实现在极端服役条件下工程示范应用。

考核指标：研发出 3~4 种新型轻质耐高温材料及其制备方法，高温钛合金 700°C/300MPa/0.5h 条件下的蠕变性能提升 30%以上，钛铝金属间化合物 700°C疲劳强度提升 40%以上，构件制造成品率提升 30%以上；开发轻质耐高温材料高温蠕变与疲劳性能预测程序 1 套，包含组织模型、实验数据分析与处理模型、预测模型等；研制出微观结构原位高通量表征装置 1 套，成像分辨率优于 10 μ m，时间分辨 200~500ms；制定标准和技术规范 2 项；在 3~4 个重大工程关键材料上获得示范应用。

8. 青年项目

8.1 车载复合材料 LNG 高压气瓶制造基础及应用技术

研究内容：针对车载复合材料液化天然气（liquefied natural gas, LNG）高压气瓶的制造与应用，研究 LNG 介质相容的树脂基复合材料体系设计与制备；耐极端环境复合材料 LNG 气瓶结构设计技术；复合材料 LNG 高压气瓶抗渗漏技术；复合材料 LNG 高压气瓶制造技术；复合材料 LNG 高压气瓶的性能评价技术。

考核指标：建立容积 1000L 以上复合材料 LNG 高压气瓶的设计方法，复合材料 LNG 高压气瓶工作压力 1.59MPa，理论充满率 $\geq 88\%$ ，工作温度低于 -162°C ，漏放气速率 $\leq 6 \times 10^{-7} \text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，与同尺寸金属 LNG 气瓶相比减重 30%以上。

8.2 新一代结构功能一体化泡沫的制备和应用

研究内容：面向结构功能一体化泡沫技术迭代的迫切需求，开发具备负泊松比和高耐火保温等功能的泡沫，主要针对新型多级结构负泊松比结构泡沫材料、耐高温聚酰亚胺泡沫和高温可发泡防火材料等开展攻关，并开展其复合材料研究，在结构支撑、保温隔热等领域得到应用。

考核指标：负泊松比材料的泊松比 $-1.4 \sim 0.2$ 可调，拉伸杨氏模量大于 1MPa，能量吸收提高达到 5 倍以上，冲击加速度峰值降低 50%；聚酰亚胺泡沫长期使用温度不低于 300°C ，密度不高于 $10\text{kg}/\text{m}^3$ ；高温可发泡防火材料 300°C 发泡 1.5 倍，烟毒性达到 AQ1，耐火极限 2h。

8.3 单晶高温合金先进定向凝固技术及其精确模拟

研究内容：针对当前航空发动机单晶涡轮叶片生产合格率低、冶金缺陷频发的现状，开展单晶高温合金及叶片高温

度梯度液态金属冷却(LMC)定向凝固技术研究,突破 LMC 技术中动态隔热层配置、晶体取向控制、模壳制备、低熔点金属污染控制等关键技术,实现 LMC 技术的多场耦合、多尺度精确模拟,研究复杂结构单晶叶片在高梯度定向凝固中的缺陷形成、演化机理,发展缺陷控制技术。

考核指标: LMC 工艺制备的单晶合金高周疲劳性能比传统定向凝固工艺提高 50%; LMC 工艺制备的航空发动机单晶叶片一次枝晶间距 $<240\mu\text{m}$; 发展单炉叶片数量 ≥ 18 件、毛坯合格率 $>70\%$ 的高效单晶叶片制造技术; 申请核心发明专利 3 项以上。

8.4 海洋油气钻采关键部件用高强高韧合金

研究内容: 针对海洋油气随钻测量和定向钻井、海底井口设备关键部件主要依靠进口问题,开展时效硬化型高强韧镍基、铁镍基耐蚀合金设计、高纯净低偏析冶金、强韧化机理、应力腐蚀疲劳失效寿命评估理论与方法等基础共性技术和产业化关键技术研究,实现高强韧、大规格、高均质耐蚀合金和超高强度高耐蚀合金验证性示范应用。

考核指标: 高强韧高镍和镍基耐蚀合金 2 个牌号,各项技术指标全面达到 API 6ACRA 和 API 6A718 现行标准要求,夹杂物等级(含碳氮化合物) ≤ 1.0 级、 -60°C 弦向冲击功与轴向冲击功之比 ≥ 0.8 ,达标棒材直径不小于 400mm; 系列高性能合金实现在高酸性油气和海洋油气工程中的验证性示范应用。直径 100 至 200mm, $\sigma_b \geq 1500\text{MPa}$ 、 $\sigma_{0.2} \geq 1400\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 12\%$ 的时效硬化型超高强韧镍基或铁镍基耐蚀合金研

究取得进展。

8.5 基于激光增材制造技术的超轻型碳化硅复合材料光学部件制造

研究内容：面向空间光学系统轻量化的发展需求，研究新型超轻型碳化硅复合材料光学部件预制体激光增材制造用粉体原料的设计与高效制备技术；开发基于激光增材制造技术的碳化硅复合材料光学部件基体成型与致密化技术；开发基于激光增材制造技术的碳化硅复合材料光学部件表面致密层制备技术；开展超轻型碳化硅复合材料光学部件的加工验证研究。

考核指标：碳化硅复合材料弯曲强度 $\geq 200\text{MPa}$ ，弹性模量 $\geq 200\text{GPa}$ ，热导率 $\geq 100\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，热膨胀系数 $\leq 3 \times 10^{-6}/\text{K}$ ；碳化硅复合材料光学部件口径 $\geq 350\text{mm}$ ，轻量化率 $\geq 80\%$ ，面密度 $\leq 25\text{kg}/\text{m}^2$ ；研制出 350mm 以上口径碳化硅复合材料光学部件，表面粗糙度 $R_a \leq 1\text{nm}$ ，面形精度 $\text{RMS} \leq \lambda/40$ ($\lambda=632.8\text{nm}$)，500-800nm 波段平均反射率 $\geq 96\%$ 。

8.6 基于激光技术的材料服役行为多维度检测技术和装备

研究内容：针对核电、海工等领域极端条件下结构材料服役性能远程在线、多维度、智能化检测的发展需求，开展基于激光技术的光谱、表面声波、超声或多种方法融合的材料组分、结构特性、力学性能、缺陷特征检测新原理和新方法研究，发展极端条件下结构材料服役行为的实时、原位、无损检测技术，研制与材料基因工程大数据、人工智能分

析算法和机器人技术深度融合的材料多维、多尺度在线监测原型装置，实现多场耦合极端环境下材料多层次、多维度服役性能原位无损在线测量及示范应用。

考核指标：基于先进激光技术的、指标国际先进的 3 种材料服役性能原位无损在线测量方法；关键材料服役行为多维度非接触无损检测装备 1 套：关键痕量元素测量限优于 100ppm，材料力学性能测量精度高于 85%，可检测 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 以上尺度内部缺陷或损伤；在 2 种以上典型材料服役场景获得验证性示范应用；申请核心发明专利 8 项以上。

8.7 超高刚度镁基复合材料的集成计算设计与制备

研究内容：以航空、航天或高铁领域为应用场景，针对超高刚度镁基复合材料特点，发展高刚度镁合金集成材料计算软件和镁基复合材料高通量实验技术，开展基于弹性变形抗力提升的镁合金基体成分设计和增强体种类、尺寸和分布形态对镁合金刚度和强韧性影响规律的研究工作，研发多尺度增强体复合构型强化的镁合金材料高效制备与组织调控技术，建立高刚度镁基复合材料及其典型构件的全流程制备技术，并实现在重大工程中的应用验证。

考核指标：研发一套适用于高刚度镁合金组分与增强体快速筛选的高通量制备系统，单次试验可制备试样数大于 10^2 数量级；研制出 1 种以上高刚度镁合金复合材料：密度 $\leq 2.0\text{g}/\text{cm}^3$ ，弹性模量 $\geq 90\text{GPa}$ ，室温抗拉强度 $\geq 350\text{MPa}$ 、屈服强度 $\geq 250\text{MPa}$ ；研发 1~2 种高刚度镁合金典型构件，在航空、

航天或高铁领域实现验证性示范应用。

8.8 增材制造先进金属材料的实时表征技术及应用

研究内容：研发基于同步辐射光源的原位表征技术与装备，动态捕捉增材制造过程中高温下微秒级时间尺度和微米级局域空间内的相变和开裂；通过高通量的样品设计和多参量综合表征手段，揭示动态非平衡制备过程中材料组织结构的演化和交互作用规律。面向典型高性能结构材料，揭示增材制造快速熔化凝固超常冶金过程对稳定相、材料组织结构和最终性能产生影响的因素，快速建立材料成分-工艺-结构-性能间量化关系数据库；结合材料信息学方法，发展增材制造工艺和材料性能高效优化软件，在典型增材制造材料的设计与优化中得到应用。

考核指标：发展基于同步辐射光源的增材制造原位表征技术与装备，在多个尺度上实时追踪增材制造过程中材料组织演变、裂纹生长和化学反应的动态过程。实现单点表征区域 $> 200\mu\text{m}$ ，空间分辨率 $\leq 10\mu\text{m}$ ，时间分辨率 $\leq 5\mu\text{s}$ ，表征通量 $> 10^3$ 样品空间成份点的原位无损分析；构建高温合金、不锈钢、钛合金、铝镁合金等高性能结构材料成分-工艺-结构-性能数据库，开发增材制造工艺优化专用软件，应用于三种增材制造材料的设计与优化。申请发明专利 3~5 项，软件著作权 2~3 项。

8.9 新一代抗低温耐腐蚀高强韧贝氏体轨道钢

研究内容：针对低温下贝氏体钢中亚稳残余奥氏体易转变为脆性马氏体，增加贝氏体钢轨道安全服役隐患的问题，

研究腐蚀、低温环境下贝氏体轨道钢（含钢轨和辙叉）的失效破坏机制，建立贝氏体轨道钢“夹杂物特性-组织结构-常规性能-服役条件-失效方式及寿命评估”数据库，开发适用于腐蚀、低温环境的新一代高强韧性、长寿命贝氏体轨道钢及其冶金全流程制造关键技术。

考核指标：抗低温耐腐蚀贝氏体轨道钢牌号 1 个，完整数据库 1 套；贝氏体轨道钢的室温下抗拉强度 $\geq 1350\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 15\%$ 、 $A_{ku}\geq 130\text{J}$ ， -40°C 下 $A_{ku}\geq 80\text{J}$ 、 $K_{IC}\geq 60\text{MPa m}^{1/2}$ 、 $da/dN\leq 15\text{m/Gc}$ ($\Delta K=10\text{MPa m}^{1/2}$)、 $da/dN\leq 50\text{m/Gc}$ ($\Delta K=13.5\text{MPa m}^{1/2}$)；耐腐蚀性能较现役轨道钢提高 20%以上；申请发明专利 5 项以上。