

# 2024 年度国家自然科学基金专项项目

## ——“粉末冶金法制备低成本大体积高均质钛合金构件的 基础研究”项目指南

深海战略装备是实现海洋强国战略的重要保证。目前服役的海洋装备用钢质壳体因其高容重比成为深潜无法突破的瓶颈，钛合金的耐压壳体成为大潜深装备的重要选择。长期以来，我国对钛合金粉末冶金基础理论与关键技术缺乏系统深入研究。通过开展大尺寸高性能钛合金构件的粉末冶金材料、制备与成形等原理方面的研究，抢占战略制高点，实现我国钛合金粉末冶金成形理论与关键技术创新，为支撑我国深海重大装备研制的关键材料自主保障打下坚实基础。

### 一、 科学目标

面向我国深海领域重大装备对大体积钛合金构件的迫切需求，建立和发展粉末冶金法制备低成本、大体积、高均质钛合金构件的新理论、新技术，着力在钛合金新成分设计、大单重坯（数十吨）制备过程原理、大体积构件成形-调性-失效机理等基础研究方面取得突破性进展，大幅提升我国在粉末冶金钛合金领域的自主创新能力。

### 二、 资助研究方向

(一)粉末冶金法制备低成本大体积高均质钛合金坯及构件的基础研究。

针对深海装备用大单重(数十吨)钛合金坯及大尺寸构件制备难、成形难、调性难等关键难题，建立基于粉末冶金的高强韧大体积低成本钛合金成分设计新理论与新方法；揭示大体积高均质钛合金坯粉末

冶金制备过程原理与调性机理；厘清大尺寸粉末冶金钛合金构件失效机理并提出全生命周期失效控制新方法。形成粉末冶金法制备低成本大尺寸高均质钛合金构件的新理论、新技术，为深海领域重大装备的材料自主保障打下坚实基础。

## （二）深海服役粉末冶金高强韧钛合金的成分设计及增韧机理。

针对钛合金韧性提升难这一共性问题，揭示钛合金韧性与成分、组织结构等因素的内在关系，提出高韧性钛合金成分设计理论模型；构建基于粉末冶金多元素扩散约束的机器学习模型，并实现高韧性钛合金成分高精度预测；研制出高强高韧性 ( $K_{Ic} \geq 70 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 、冲击功  $K_{V2} \geq 100 \text{ J}$ ) 的粉末冶金钛合金，形成粉末冶金钛合金高韧性设计准则。为深海服役高韧性粉末冶金钛合金构件的研制奠定理论基础。

## （三）粉末冶金钛合金微纳孔隙强韧化机理。

针对粉末冶金钛合金残留微纳孔隙难题，揭示粉末冶金钛合金微纳孔隙全流程演化机理，阐明多尺度微纳孔隙特征对钛合金强韧性与变形机制的作用机理，形成高强韧粉末冶金成形钛合金中微纳孔隙调控新方法 with 强韧化新原理。为高性能粉末冶金钛合金构件的深海极端环境可靠服役提供科学依据。

## （四）粉末冶金钛基复合材料设计与高抗损伤机理。

针对深海领域关键构件用轻质高强钛基复合材料强度与抗损伤能力匹配不足问题，提出基于粉末冶金的钛基复合材料多尺度组织设计新方法；揭示多尺度组织参数对强度、断裂韧性等关键力学性能的影响规律及机理；阐明裂纹扩展与增强相断裂以及基体塑性变形的关

系，揭示其高抗损伤机理。为深海服役高抗损伤钛基复合材料研制提供理论依据。

#### **(五) 氢在钛中的扩散行为及氢均匀脆化机理。**

针对钛的氢均匀脆化难题，建立氢在钛中扩散行为的原子尺度精确表征新方法，并揭示氢在钛中的跨尺度扩散行为及机理；建立氢扩散与材料脆性的内在关系，形成氢均匀脆化的临界判据；厘清原子尺度精确表征氢的逸出行为及机理，提出氢高效逸出新方法。为高性能深海装备钛合金关键构件的低成本高效制备奠定理论基础。

#### **(六) 粉末冶金高强韧钛合金构件近净成形高效致密化机理。**

针对深海领域粉末冶金高强韧钛合金构件近净成形中的高效致密化难题，构建复杂生坯精密压制成形的多尺度本构模型，揭示粉体快速致密化行为及机理；阐明构件高效连续烧结缺陷演变、致密化与合金化机理；形成高精度、高致密、高性能复杂钛合金构件粉末冶金高效近净成形新方法。

#### **(七) 大尺寸粉末冶金高强韧钛合金塑性成形组织演变模型与模拟预测。**

针对大尺寸粉末冶金钛合金塑性成形中组织均匀性控制难题，揭示应变路径和微区应变配分对多尺度组织演变的作用机理；构建耦合滑移和相变诱导塑性及球化、再结晶的全场多尺度组织演变模型，建立宏微共时耦合计算的本构模型，实现复杂变形路径下多步成形的塑性变形和组织演变的精确模拟预测；提出大尺寸粉末冶金钛合金非均匀组织的控制新方法。

## **(八)大尺寸高强韧钛合金构件粉末冶金制备全流程组织演变与性能调控机理。**

针对深海服役大尺寸粉末冶金高强韧钛合金构件制备全流程组织演变机理不清、性能提升难等关键难题，厘清大尺寸钛合金构件粉末冶金制备全流程“工艺-组织-性能”多尺度映射关系并建成数据库；阐明大尺寸粉末冶金钛合金构件强韧性协同提升机理；发展基于机器学习的粉末冶金钛合金性能调控新方法，为深海领域大尺寸高性能粉末冶金钛合金构件的全流程组织演变与性能调性提供理论支撑。

## **(九)粉末冶金钛合金深海腐蚀疲劳失效机理及控制方法。**

针对粉末冶金钛合金构件在深海极端条件下的服役失效机制不明等问题，构建深海极端服役模拟加速失效评价方法，揭示粉末冶金钛合金在深海极端服役条件下的腐蚀疲劳失效机理；建立粉末冶金钛合金深海极端环境下的延寿模型，并提出失效控制新方法。为粉末冶金钛合金构件在海洋极端环境下的高可靠长寿命服役提供重要理论支撑。

## **(十)深海服役粉末冶金钛合金构件长效防污表面改性技术及防污机理。**

针对粉末冶金钛合金构件在深海环境中的生物污损和生物腐蚀问题，建立涂层表面改性、防污剂分子设计与界面连接等新原理与新方法，揭示涂层对粉末冶金钛合金在海洋环境中服役性能的影响规律，形成粉末冶金钛合金构件表面强化与长效防污一体化新方法，为提升其在深海环境中的服役性能奠定理论基础。

### 三、 资助计划

拟资助 1 项高额度项目和 9 项中等额度项目，资助研究方向 1 为高额度支持项目，资助强度为 1000 万元/项，资助期限为 3 年；资助研究方向 2-10 为中等额度资助项目，资助强度为 300 万元/项，资助期限为 3 年。申请书中研究期限应填写“2025 年 1 月 1 日—2027 年 12 月 31 日”。

### 四、 申请要求及注意事项

#### （一） 申请条件

本专项项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题或者其他从事基础研究的经历。
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

1. 本专项项目申请时不计入高级专业技术职务（职称）人员申请和承担总数 2 项的范围；正式接收申请到国家自然科学基金委员会作出资助与否决定之前，以及获得资助后，计入高级专业技术职务（职称）人员申请和承担总数 2 项的范围。

2. 申请人和参与者只能申请或参与申请 1 项本专项项目。
3. 申请人同年只能申请 1 项专项项目中的研究项目。

#### （三） 申请注意事项

1. 申请接收时间为 2024 年 12 月 1 日—2024 年 12 月 9 日 16 时。

2. 本专项项目申请书采用在线方式撰写。对申请人具体要求如下：

(1) 申请人应当认真阅读本项目指南和《2024 年度国家自然科学基金项目指南》的相关内容，不符合项目指南和相关要求的申请项目不予受理。

(2) 申请人应当认真阅读《2024 年度国家自然科学基金项目指南》申请规定中预算编报要求的内容，认真如实编报项目预算。

(3) 申请人登录科学基金网络信息系统，资助类别选择“专项项目”，亚类说明选择“研究项目”，附注说明选择“科学部综合研究项目”。申请代码 1 应按照拟资助研究方向后标明的申请代码要求选择工程与材料科学部 E04 下属申请代码。以上选择不准确或未选择的申请项目不予受理。

高额度项目的依托单位和合作研究单位数合计不得超过 5 个；中等额度项目的依托单位和合作研究单位数合计不得超过 3 个。主要参与者必须是项目的实际贡献者。

(4) 本专项项目旨在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，成为一个专项项目集群。申请人应根据本专项拟解决的具体科学问题和项目指南公布的拟资助研究方向，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。

(5) 申请人应当按照专项项目申请书的撰写提纲撰写申请书。申请项目名称可以不同于拟资助研究方向下列出的研究内容名称，但

应属该内容所辖之内的研究领域。申请书正文开头应注明“2024 年度专项项目粉末冶金法制备低成本大体积高均质钛合金构件的基础研究之研究方向：\*\*\*（按照上述拟资助研究方向之一填写）”。申请书应突出有限目标和重点突破，明确对实现本专项总体目标和解决核心科学问题的贡献，并阐明围绕本项目指南研究方向拟重点突破的科学问题、达到的研究目标或技术指标。

如果申请人已经承担与本专项项目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。

(6) 本专项项目实行无纸化申请，申请人完成申请书撰写后，在线提交电子申请书及附件材料。依托单位只需在线确认电子申请书及附件材料，无须报送纸质申请书，但必须对本单位申请人所提交申请材料的真实性和完整性进行认真审核。依托单位应在项目接收工作截止时间前（2024 年 12 月 9 日 16 时）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；在截止日期后 24 小时内在线提交本单位申请项目清单，未按时提交清单的申请将不予受理。项目获批准后，依托单位将申请书的纸质签字盖章页装订在《资助项目计划书》最后，在规定的时间内按要求一并提交。

### 3. 咨询方式

(1) 填报中如遇到技术问题，可联系国家自然科学基金委员会信息中心协助解决（联系电话：010-62317474）。

(2) 国家自然科学基金委员会项目材料接收工作组负责接收申请材料，如材料不完整，将不予接收（联系电话：010-62328591）。

(3) 关于指南研究方向，可咨询国家自然科学基金委员会工程与材料科学部（联系电话：010-62325945）。

#### (四) 其他注意事项

1. 本专项项目鼓励多学科研究团队联合攻关，满足多学科集成需要，跨越学科间屏障，解决本研究专项相关的基础性科学问题。

2. 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，实现在研究材料、基础数据和实验平台上的项目集群共享。项目执行过程中须关注与本专项其他项目之间的相互支撑关系。

3. 为加强项目的学术交流，促进专项项目集群的形成和多学科交叉，本专项项目集群将设专项项目指导专家组和协调推进组，每年举办一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。获资助项目负责人必须参加上述学术交流活动，并认真开展学术交流。