

题目编号：BJ-01

铅冷快堆用陶瓷主泵叶轮创制及其极端使役环境性能验证比赛方案

一、发榜单位

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

二、题目名称

铅冷快堆用陶瓷主泵叶轮创制及其极端使役环境性能验证

三、题目介绍

（一）研究背景

核电作为我国“双碳”战略的基荷能源，其安全性与可持续发展直接关系到国家能源安全与全球气候治理进程。根据《“十四五”现代能源体系规划》，我国明确提出“积极安全有序发展核电”，目标到 2025 年核电运行装机容量达 7000 万千瓦，2035 年发电量占比提升至 10%，2060 年装机量突破 4 亿至 5 亿千瓦。为贯彻习近平总书记加快发展新质生产力，推动我国核能“热堆-快堆-聚变堆”的三步走国家战略，铅冷快堆（Lead-cooled Fast Reactor, LFR）成为第四代核能系统的重点发展方向之一。

铅冷快堆以液态铅或铅铋合金作为冷却剂，具备高安全性、优异的中子经济性和可持续燃料循环的优势。然而，当 LFR 主循环泵长期在高温 $>500^{\circ}\text{C}$ 和高流速（最大线速度 $>12\text{m/s}$ ）的液

态金属环境使役时，面临极端工况下的高温蠕变、材料冲蚀与氧化腐蚀等挑战，传统金属叶轮无法胜任。因此，国内核电站和涉核企业一致将开发耐高温高流速冲蚀、长寿、高强的陶瓷主泵叶轮列为 LFR 工程化应用的关键难题之一。

中科院宁波材料所浙江省数据驱动高安全能源材料及应用重点实验室通过"化学剪刀"辅助的结构编辑策略，在《Science》等期刊发表突破性研究，合成超 50 种新型 MAX 相材料，显著提升了其力学、热学、催化等性能。MAX 相材料凭借层状结构自愈能力，高温力学性能与液态铅铋的化学相容性，成为突破 LFR 材料瓶颈的关键之一。目前中核集团计划 2025 年建成小型铅铋示范堆，对 MAX 相材料等新型陶瓷材料在第四代核电技术领域的应用寄予厚望，其中以 MAX 相替换不锈钢制造主泵叶轮的需求尤为迫切。

在叶轮等复杂结构生坯加工中，传统聚乙烯醇、聚乙二醇粘结剂因其生坯弯曲强度低且热脱残留物多，难以满足复杂生坯拓扑形貌的高精度加工要求；传统聚芳醚树脂强度较高，但熔点高、熔体粘度大，难以与 MAX 相材料均匀混合制备生坯。因此，本实验室急需一种高强、高可溶的新型的高分子聚合物粘结剂，以达成高强韧、低残留和复杂结构精密加工之间的平衡，为精密部件的设计和制造提供关键技术支撑。

（二）研究需求

本项目面向铅冷快堆 MAX 相主泵叶轮，开展粘结工艺优

化、流体-结构一体化设计、叶轮制造拟开展以下研究：

1. 面向 MAX 相生坯的高强、高可溶聚芳醚粘结剂开发

开发高强、高可溶聚芳醚高分子材料，以其作为生坯粘结剂优化复杂拓扑结构的烧结与成型工艺，协同脱脂-烧结，控制碳残留，调控 MAX 相元素，开展叶轮生坯的高精度加工研究，优化 MAX 相叶轮烧结过程。

2. 主泵叶轮材料的使役过程性能仿真研究

基于多尺度建模与测试，建立 MAX 相材料及其生坯材料的宽温域静动态本构关系模型，预报材料的力热学行为。

3. 主泵叶轮在极端多场耦合环境下的综合性能模拟

研究叶轮拓扑外形对主泵内流体动力学性能的影响，提高泵的使用效率；优化高温下高速金属流质在叶轮表面的应力分布，旨在提升叶轮的抗冲蚀能力，延长其极端物-化条件下的使役寿命。

（三） 研究目标

本课题旨在研发高强、高可溶 MAX 相生坯的粘结剂，调控烧结和加工工艺，优化主泵叶轮结构，提升叶轮耐高温冲蚀寿命，最终研制基于 MAX 相的高温高流速陶瓷叶轮，提供完整的设计、制造及性能优化方案，以满足铅冷快堆的实际应用需求。具体目标包括：

1. 高强韧粘结材料开发：高分子聚合物溶解度 $\geq 23\text{wt}\%$ ，拉伸强度 $\geq 120\text{MPa}$ ，弯曲强度 $\geq 180\text{MPa}$ ；

2. MAX 相材料本构关系开发：建立 MAX 相生坯和叶轮结构本构关系模型和仿真模型，模量和强度预报误差 $<10\%$ ；

3. MAX 相叶轮流体-结构一体化设计报告一份，建立流速-应力-温度的动态仿真模型，优化叶轮的流体结构。

（四） 预期成果

本研究预计取得如下成果：

1. 高分子粘结剂一种；

2. MAX 相叶轮一套；

3. MAX 相及其生坯材料宽温域多尺度仿真模型及本构关系各一套；

4. MAX 相及其生坯材料机加工仿真模型各一套；

5. 基于流体-结构一体化分析的叶轮复杂环境仿真模型一套。

（五） 选题价值

本项目符合国家能源发展战略和先进核能装备自主化需求，其成果可在第四代铅冷快堆、高温熔盐堆、航空航天耐高温流体机械等领域推广应用。

1. 技术需求和行业价值

解决铅冷快堆主泵叶轮的高温耐久性和极端使役寿命预测问题，满足核能设备长期安全稳定运行需求。未来可促进耐高温陶瓷技术在高端装备制造业中的应用，如航空发动机叶片、熔盐泵等。

2. 应用前景广阔

一代材料一代装备，该技术未来可应用于其它液态金属冷却快堆、核电站主泵、高温气体循环设备等领域，推动核能装备技术跨越式前进。不仅于此，高温耐磨陶瓷技术可推广至航空航天、能源装备、化工高温泵等多个行业。

3. 科研价值和团队吸引力

本项目应用前景明确、技术创新性强。预计可以吸引核能装备、高温材料、流体机械等多个学科方向的研究团队参与。该项目涉及基础理论研究、工艺研究和工程应用研究，适合力学、核科学、有机无机材料学、核装备研究等多个学科领域的研究团队申报。

四、参赛对象

本题目只设学生赛道。

参赛对象为 2025 年 6 月 1 日以前正式注册的全日制非成人教育的各类高等院校在校专科生、本科生、硕士研究生、博士研究生（不含在职研究生），参赛人员年龄在 40 周岁以下，即 1985 年 6 月 1 日（含）以后出生。

同一作品不得同时参加第十九届“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛（以下简称第十九届“挑战杯”竞赛）其他赛道的评比。

参赛对象可以团队或个人形式参赛，每个团队不超过 10 人，每件作品可由不超过 3 名指导教师进行指导。可以

跨专业、跨学校、跨单位、跨地域组队，但同一团队所有成员均应符合本赛道相关年龄、身份要求。每件作品只可由 1 所高等院校作为参赛主体提交申报。

五、答题要求

（一）答题形式

参赛者需提供以下内容：

1. 研究报告：包括对高温高流速陶瓷主泵叶轮的结构优化与性能研究的技术路线、研究思路、研究方法、创新点及实施计划的详细阐述。报告应详细解释所提出的技术方案，包括但不限于：选题背景及行业需求分析，研究目标与关键技术挑战，技术方案与创新点，生坯粘结剂配方，材料与结构优化方法，流固耦合仿真分析及温度分布机制研究，项目的实施路径、时间安排与预期成果。

2. 实验数据和仿真结果：包括但不限于 CFD 仿真结果、FEM 分析报告、流固耦合模拟结果、材料性能数据等，确保能够展示研究过程中使用的仿真模型、假设条件、计算结果及其对应的分析。

3. 技术方案书或设计图纸：根据研究方向，参赛者需要提交相关的设计图纸、优化方案或产品设计草图，包括 MAX 相叶轮的结构图、叶轮流体流场优化设计等内容。

4. 代码（如果有）：若参赛者在解决问题过程中采用了相关的程序或算法开发（如仿真计算、优化算法等），需提供相

关代码，并附上简要的代码注释和使用说明。

（二） 答题深度要求

1. 参赛作品需能够深入分析并解决铅冷快堆用高温高流速 MAX 相陶瓷主泵叶轮的结构优化与性能提升的技术难题，并提供生坯粘结剂使用方法。

2. 技术方案应具有创新性，强调对新材料、先进制造工艺、流体力学分析、结构优化等方面的独立见解和可行性论证。

3. 方案中应提供详细的仿真结果和实验数据，并对材料性能、结构优化和泵效能的关系进行定量分析，确保方案的科学性和可实现性。

六、作品评选标准

（一） 评选标准

1. 创新性（30%）

技术创新：是否提出了新颖的技术或解决方案，能够有效解决铅冷快堆用陶瓷主泵叶轮的高温高流速问题。

技术难度：解决的问题是否具有技术挑战性。

2. 科学性与可行性（25%）

方法论：方案是否有科学依据，研究方法是否合理。

可行性：提出的技术方案在实际中是否能够实施。

3. 实验验证与数据支持（20%）

实验结果：是否提供了有效的实验数据来支持技术方案。

仿真数据：是否通过仿真验证了方案的有效性，数据是否

准确。

4. 设计合理性与应用价值（15%）

设计合理性：方案的设计是否符合实际需求，是否考虑了材料、制造工艺等。

应用价值：方案在实际工程中能否落地应用。

5. 展示与报告质量（10%）

报告质量：报告是否清晰、详细，能够准确表达技术方案。

答辩表现：答辩时，参赛者是否能够清晰地解释方案、回答问题。

（二）评分等级

1. 擂主奖（90-95分）创新性强、方案明确可行，实验和仿真结果充分可靠，能够揭示一定科学道理，具有很高的实际应用价值。

2. 特等奖（90-95分）创新性强、方案可行，实验和仿真结果充分，具有较高的实际应用价值。

3. 一等奖（80-89分）方案具有一定创新性，实施可行，实验数据较充分，具有一定的应用价值。

4. 二等奖（70-79分）方案较为常规，实验和仿真数据支持较充分。

5. 三等奖（60-69分）创新性较弱，技术方案可行性一般，实验和数据支持一般。

七、作品提交时间

2025 年 5 月-8 月，各高校组织学生参赛，安排专业人员给予指导，为参赛团队提供支持保障。

2025 年 8 月 15 日前，各参赛团队通过大赛申报系统提交作品，具体要求详见作品提交方式。

2025 年 8 月底前，由大赛组委会会同发榜单位共同完成初审，确定入围终审擂台赛的晋级作品和团队。

2025 年 9 月，发榜单位安排专门团队提供帮助和指导，各晋级团队完善作品，冲刺攻关参加终审擂台赛，角逐“擂主”。

八、参赛报名及作品提交方式

（一）报名方式

（1）参赛选手登录“挑战杯”官网 2025.tiaozhanbei.net，在“揭榜挂帅”擂台赛报名入口注册账号，登录大赛申报系统在线填写报名信息。报名信息提交后，下载打印系统生成的报名表。

（2）申报人在报名表对应位置加盖所在学校公章。

（3）将盖章版报名表扫描件上传至报名系统，等待系统审核。请参赛选手注意查看审核状态，如审核不通过，需重新提交。

（4）系统开放报名时间为 2025 年 5 月 30 日—6 月 30 日，逾期后系统将自动关闭报名功能。

（二）作品提交方式

参赛者需通过指定平台提交完整的作品方案，提交的形式

为：PDF 格式的总体研究报告，包括图表、分析、数据等内容；实验报告和仿真报告；CAD 图纸/技术方案；代码（若有），需提交可执行代码及相关说明文件，代码格式为*.zip、*.tar 等压缩包形式。

申报作品统一打包压缩提交至大赛申报系统，压缩包命名方式为：申报人所在单位-申报人姓名-作品名称-联系电话（例如：XX 大学-张 XX-XX 方案-手机号）。

九、赛事保障

（一）出题单位可为参赛者提供的指导帮助

1.参观应用场景与实践调研

参赛者可以参观核能材料研发相关设施，了解实际需求。

提供调研机会，与核能材料等行业专家交流，获取一手资料。

2.实验条件与器材支持

提供高温实验设备、陶瓷材料测试等相关设备和设施。

参赛者可以借用这些设备进行实验验证，产出知识产权需与出榜单位共享。

3.参考研究资料和技术文献

提供相关领域的技术文献、研究报告和学术论文，帮助参赛者了解现有技术进展。

4.专家指导

配备领域专家提供技术指导，定期解答问题，帮助解决难

题。

5.产教融合与合作支持

促进与高校和科研院所的合作，为参赛者提供更多的科研资源。

提供产学研合作机会，推动技术成果转化。

6.产业化支持

协助参赛者与企业对接，推动技术的产业应用。

提供相关政策和资金支持，帮助团队实现技术转化。

（二）落实保障措施

1.资源保障：确保实验设备、专家和资料的及时提供。

2.沟通保障：建立专门沟通渠道，确保问题快速解决。

3.进度跟踪：定期检查项目进展，确保按计划执行。

通过这些支持，参赛者可以顺利完成项目，并推动技术应用。

十、设奖情况及奖励措施

1. 设奖情况

本榜单为学生赛道，拟设置赛事“擂主”1个，特等奖5名，一等奖5名，二等奖5名，三等奖5名。最终授奖数量视作品申报数量和质量情况报组委会同意后动态调整。2025年“揭榜挂帅”擂台赛学生赛道获奖情况将按照一定分值计入第十九届“挑战杯”竞赛学校团体总分，具体分值以第十九届“挑战杯”竞赛章程为准。

2. 奖励措施

学生赛道的获奖者将分别获得丰厚的奖金和一系列发展机会。“擂主”奖励 10 万元；特等奖 5 名，奖金 5000 元；一等奖 5 名，每名 3000 元；二等奖 5 名，每名 2000 元；三等奖 5 名，每名 1000 元。同时，为获奖者提供至少 3-6 个月的实习实践机会。根据实际参赛情况商大赛组委会调整奖励个数。

3. 奖金发放方式

比赛结束后，单位比赛专班工作人员与获奖团队取得联系，填写奖金申请表，待获奖团队提供银行卡详细信息后 1 个季度内，将奖金一次性发放至获奖团队提供的银行卡中。

十一、比赛专班联系方式

1. 专家指导团队

顾问专家：陈老师，联系电话：13884409111

顾问专家：宋老师，联系电话：15168181357

负责比赛期间技术指导保障。

2. 赛事服务团队

联络专员：李老师，联系电话：15022650387

负责比赛期间组织服务及后期相关赛务协调联络。

3. 联系时间

比赛期间工作日（9:00-17:00）

附：发榜单位简介

中国科学院宁波材料技术与工程研究所（简称宁波材料所）是浙江省内首个中科院直属科研机构。该所围绕材料技术、材料+制造、材料+能源、材料+医工四大领域布局，已成为全球材料科学领域前 1‰ 的研究机构，承担科研项目超 7300 项，发表 *Science/Nature* 等期刊论文近 1.2 万篇，授权专利 4100 余件，获国家级科技奖励 3 项、省部级 37 项，并建成海洋关键材料全国重点实验室等 45 个国家级平台。宁波材料所拥有院士 8 人、杰青及海外高层次人才 400 余名，形成 900 余人次的人才支持规模。其搭建的全链条创新平台价值 13 亿元，与 1500 多家国内企业及 250 多个国际机构合作，推动 96 项重大科技成果转化带动企业新增销售额超 300 亿元。