

新型核工程材料的研究与发展

苏香彪

成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山 614000

摘要: 受全球碳中和战略的驱动, 核能装机容量预计显著上扬, 但传统锆合金包壳材料在极端工况时所存在的性能缺陷急需突破, 本文把目光投向新型核工程材料研发, 系统梳理了碳化硅复合材料、氧化物弥散强化钢与事故容错燃料等材料的抗辐照、耐高温及耐腐蚀方面特性。从制备技术的层面看, 采用化学气相沉积、放电等离子烧结和氦离子注入等先进工艺, 可有效提升材料的致密化与抗损伤能力, 诸如国际热核实验堆的国际合作项目, 证实了钨铜偏滤器、铍基第一壁等材料是可靠的, 尽管新型材料在安全性与热效率上优势十分显著, 但还是面临多物理场耦合损伤机制不明确、辐照测试资源不足以及产业化成本高昂等挑战, 未来需要运用跨尺度模拟、工艺标准化以及政策协同手段, 助力兼具本质安全与长寿命属性的核材料规模化推广, 为先进核能系统以及全球能源转型提供关键后盾。

关键词: 核工程材料; 抗辐照性能; 碳化硅复合材料; 氧化物弥散强化钢; 事故容错燃料

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.27

引言

核材料是核工业发展的物质基础和先导, 核材料的研究、开发和应用的深度和广度决定着核工业的发展水平^[1]。在全球碳中和战略驱动下, 核能装机容量预计将在 2050 年达到当前三倍规模。传统锆合金包壳材料在福岛核事故中暴露出的热力学性能缺陷, 推动核工程材料研究向极端服役环境适应性方向转型^[2]。本文通过整合材料科学、核物理与工程热力学等多学科研究成果, 构建新型核工程材料的技术评价体系, 为先进核能系统的工程实践提供理论支撑。

1 核工程材料的背景与重要性

1.1 核能在现代能源结构中的地位

由国际原子能机构最新统计数据显示, 全球电力供给的总量里, 十分之一是来自核能发电, 此清洁能源对低碳基荷电力领域的贡献占比为百分之二十八, 以法国与瑞典为代表的核电技术领先国, 通过构建以核能起主导作用的

电力生产体系, 显著降低了经济发展进程里的碳排放痕迹, 其单位 GDP 对应的碳排放量降幅达六成以上^[3]。值得瞩目的是, 当小型模块化反应堆技术以及快中子增殖堆逐渐走向商业应用阶段, 作为战略性能源的核能, 在推动全球能源体系转型进程里的关键作用正不断凸显。

1.2 核工程材料特性与研究进展

核工程材料是实现核能系统安全高效运行的核心要点, 可分成结构材料, 这些材料须在 800℃ 以上的高温、 10^{25} 中子/cm² 通量辐射以及液态金属腐蚀这类极端条件下, 同时契合力学强度、辐射耐受程度和化学稳定性的要求, 针对传统锆-4 合金在失水事故里暴露出来的锆水反应隐患, 全世界正加快本质安全材料的研发步伐, 美国《核能研究路线图》说明, 碳化硅纤维增强复合材料可抵御 1200℃ 的高温, 让堆芯出现熔毁风险降低 99%, 此项突破不只是增进了反应堆的固有安全性, 还为下一代核能系统提供了关键的材料后盾^[4]。

2 新型核工程材料的特性

2.1 耐高温性能

碳化硅材料依托其高达 2800 摄氏度的熔点这一特性，以及仅 0.11 靶恩的中子吸收截面，在快中子反应堆燃料包壳材料抉择时呈现出明显的优势，日本原子能研究开发机构开展实验研究后证实，于 1300 摄氏度高温蒸汽环境下，碳化硅纤维增强碳化硅基复合材料，依旧能维持高于 200 兆帕的抗弯强度值，该性能指标与传统锆合金材料相比提高了将近四倍，切实体现了其在极端工况下的极佳稳定性。

2.2 辐射防护能力

氧化物弥散强化钢凭借在基体里均匀分布大小小于 50 纳米的氧化钇纳米颗粒，体现出杰出的抗辐照特性，其辐照肿胀率可稳定地维持在每原子位移损伤 0.1% 以下，由中国广核集团自主开发的低活化马氏体钢在 14 兆电子伏特中子辐照的环境中，其尺寸稳定性的表现明显比欧洲同类产品 Eurofer97 钢出色，这一突破性进展为未来聚变反应堆第一壁结构材料的筛选提供了可靠的技术办法。

2.3 机械性能与腐蚀抵抗

美国西屋公司研发的事故容错燃料涂层技术，采用铬铝氮多层薄膜包裹燃料芯块，促使锆合金材料在 1200 摄氏度高温蒸汽环境中的氧化速率明显降低，降幅最高可达百分之九十，来自俄罗斯国家原子能公司的实验数据表明，在铅铋共晶冷却剂中，钼锆钛合金的年腐蚀速率不到 5 微米，此优异性能刚好满足 BREST - OD - 300 快堆长达 60 年的设计寿命条件，为先进核反应堆系统的长期平稳运行提供了关键支持。

3 新型核工程材料的制备技术

3.1 先进合成技术

核工程材料制备技术正迅速朝着高纯度、高致密化方向前行，化学气相沉积技术利用三

氯甲基硅烷前驱体于 1300 - 1500℃ 下的分解反应达成，可制取带有纳米级均匀涂层的碳化硅纤维复合材料，粉末冶金法借助机械合金化把纳米级氧化钇颗粒均匀分散到铁基合金中，结合热等静压技术让晶界强度增加 30% 以上，韩国原子能研究机构开发的放电等离子烧结技术达成重大突破，可在 5 分钟内实现钼钽锆合金的致密化，且将晶粒尺寸把控在 5 微米以内，大幅提高材料的抗蠕变能力，这些先进的合成技术对核工程材料性能优化起到了关键支撑作用。

3.2 材料改性方法

对辐照缺陷的调控以及界面结构的优化是提升核工程材料性能的核心路数，美国麻省理工学院创造的氦离子注入工艺，借助预先于钨基体里打造直径 2 至 5 纳米的氦气泡阵列，成功实现将材料在 14 兆电子伏中子辐照环境下的体积膨胀率稳定控制在每日每原子位移 0.05% 以内。处于表面强化领域里，靠激光熔覆技术制备的铬铝氧化物梯度复合涂层，大大提升了锆合金抵御高温氧化的能力，其于高温蒸汽中的氧化速率能够降低到每小时每平方厘米 0.1 毫克以下，由中国原子能科学研究院开发出来的电子束物理气相沉积技术，借助定向生长钼铜合金表面钨涂层的柱状晶体结构，使材料热负荷承载的极限提高至每平方米 25 兆瓦，刚好满足聚变堆偏滤器应对极端热冲击的严苛条件。

3.3 规模化生产与质量控制

处于核工程材料规模化生产的过程里，达成成分均匀性与缺陷控制的有效平衡极为重要，法国 AREVA 集团借助在其氧化物弥散强化钢连续生产线上集成在线中子衍射监测系统，实现了对纳米颗粒分布的实时精准管控，成功把不同批次产品的性能差异稳定控制在正负百分之五的范围里，由日本东芝公司研发的碳化硅纤维自动编织系统，依靠高精度机器视觉

技术指引三维立体编织进程,使最终复合材料的孔隙率长期维持在百分之二以下的优质水平。^[5]在质量检测标准方面,国际标准化组织最新颁布的核级碳化硅复合材料无损检测国际标准中明确规定,采用微焦点计算机断层扫描技术与超声相控阵检测相结合的方法,能够有效检出尺寸小至十微米的材料内部缺陷,为产品质量提供了可靠保障。

4 新型核工程材料的应用前景

4.1 核反应堆结构材料

就核反应堆结构材料领域而言,新型工程材料的应用正带动技术指标大幅上扬,以第四代钠冷快堆做个例子,氧化物弥散强化钢逐渐把传统 316 不锈钢替代,用作堆芯围筒的关键材料,其设计温度能从 550 摄氏度提升到 700 摄氏度,整体热效率跟着提升了大概 15%。就聚变堆技术而言,中国聚变工程试验堆规划采用钨铜复合热沉材料作为第一壁防护层,由于纤维增强实现了界面结构优化,材料热循环的使用寿命冲破一万次大关,美国 NuScale 小型模块化堆选定铁铬铝合金作为事故容错燃料的包壳材料,此合金熔点比传统锆合金高出了 400 摄氏度,从根本上杜绝了锆水反应的安全威胁。

4.2 核废料处理与储存材料

在核废料处理范畴,凭借优异的稳定性,硼硅酸盐玻璃陶瓷固化体成了高放射性废物处置的首选方案,法国 La Hague 核处理工厂运用掺入氧化钆含量高于百分之十的玻璃配方,让材料中子吸收截面的数值达到四万九千靶恩,为长达一万年的安全存放提供了可靠支撑。就干式贮存技术而言,日本三菱重工开发出的钆强化碳化硼铝基复合材料凸显出卓越性能,其展现的中子屏蔽效能较常规混凝土提高了百分之五十,且成功让贮存容器壁厚降低了百分之四十,由俄罗斯科学家开发的氮化铀陶瓷燃料,因其热导率高达每米二十瓦且裂变

气体释放特性极低,有望让乏燃料的强制冷却周期从五年大幅缩短为一年半,大幅增进核燃料循环效率。

4.3 核安全领域的应用

核安全技术突破正借助材料创新实现大幅提升,处于熔盐堆领域,采用激光氮化工艺处理完毕的哈氏合金 C-276 材料,其与氟铍铍熔盐接触期间,年腐蚀速率已降低至每年 1.2 微米,为反应堆长达六十年的安全持续运行提供了关键依托,由瑞士保罗谢尔研究所开发的含钇稳定氧化锆辐射防护涂层,借助特殊的结构设计达成了使伽马射线剂量率降低三个数量级的屏蔽成效,同时留存柔性特质以契合机器人关节灵活运动需求,就核电站极端环境防护而言,借助氮化硼纳米管强化的硅橡胶密封材料展示出卓越性能,可在千摄氏度高温火灾状况下维持至少两小时气密性,其耐火能力远远超出常规防火材料的标准规格。

5 未来发展方向与挑战

5.1 技术瓶颈与科研挑战

现在核工程材料研究依然面临若干关键科学难题急需突破,在材料损伤机理的研究领域里,中子辐照、热应力以及腐蚀介质等多物理场耦合起来的作用机制还没完全搞懂,这成为阻碍材料性能进步的关键障碍,为处理这一挑战,欧盟正着手推进名为多尺度聚变建模的专项研究计划,努力建设包含原子尺度分子动力学模拟到宏观尺度有限元分析的跨尺度仿真体系,以求建立完整的材料损伤预测模型,再一个明显的制约因素是辐照测试资源十分短缺,现今全球范围内,仅有美国密歇根大学配备了可以精准模拟十四兆电子伏聚变中子能谱的等离子体中子源装置,这种稀缺的实验条件对新型材料验证与优化的进程影响极大。

5.2 新型核工程材料的经济挑战与政策驱动

新型核工程材料面临显著的经济层面挑

战，市场价格一般为传统材料的 2 - 5 倍，就如碳化硅纤维复合材料，单价达 8000 美元每公斤，业界正采用流化床化学气相沉积等技术实现工艺优化，预估降低能耗超 40%，市场格局呈现分化的情形：聚变堆材料大多依赖政府的资金投入，而第三代堆用到的改进型材料（如新型锆合金）已具备产业化的标准。国际能源署揣度，2040 年时，全球市场规模预计达 120 亿美元，其中事故容错材料占的比重超过 60%，政策环境呈现加速变革态势，2023 年美国核管会颁布新规，把审批时限从 7 年降至 3 年，只是要求给出超 1 万小时辐照数据；中国期望 2025 年能实现 95% 关键材料自主化，聚焦推进 20 类新材料的验证，国际管控强化促进战略储备建设实施，日本把高纯度铀储备从 3 吨增长到 15 吨，基于经济状况与政策的双重驱动，核材料产业正步入转型升级的关键阶段。

结束语

新型核工程材料的研发及应用正深刻重构核能技术发展格局，从承受 1200℃ 高温的碳化硅复合材料到对抗辐照肿胀的氧化物弥散强化钢，极端工况下新材料体系的性能突破，显著提高了核能系统的安全阈值及经济性，全球协作网络跟制备技术创新形成双轮带动，化学气相沉积、放电等离子烧结等前沿技术带动材料性能不断优化升级，如国际热核聚变实验堆的跨国项目加速材料可靠性的验证工作。多物理场耦合损伤机制分析、辐照试验资源不足以及产业化成本过高，仍是急需突破的瓶颈，未来要深化多尺度模拟跟实验验证的融合创新，充实辐照性能数据库，而且借助标准化工艺使新型材料生产成本降低，伴随小型模块化堆与聚变能技术商业化进程加速前行，兼具本质安全特征与长寿命长处的核工程材料将成为能源转型核心依托，只有凭借不断的技术迭代、政策协作与国际合作，才可实现核能系统安全性及经济性的双重跃进，为全球实现碳中和目标提供关键的材料后盾。

参考文献

- [1]王永平. 新型交通工程材料在路面施工中的应用[J]. 石材, 2024, (09): 89-91.
- [2]许建华, 杜国伟, 刘向坤, 等. 粉煤灰-矿粉复合掺合料对核工程混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (07): 90-94.
- [3]刘西川. 核工程耐热混凝土试验与应用[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告（第七卷）——中国核学会 2021 年学术年会论文集第 3 册（核设备分卷、核材料分卷）. 江苏中核华兴工程检测有限公司; , 2021: 303-307.
- [4]曹继芬, 王同胜, 周云双, 等. 核材料领域全球专利态势分析[C]//中国核学会. 中国核科学技术进展报告（第六卷）——中国核学会 2019 年学术年会论文集第 9 册（核科技情报研究分卷、核技术经济与管理现代化分卷）. 中国原子能科学研究院; 哈尔滨工程大学核科学与技术学院; , 2019: 263-267.
- [5]厦门大学能源学院, 高抗辐照核工程材料的测试与开发[Z]. 鉴定日期: 2018-01-01.