

中国新一代核能用材总体发展战略研究

干勇, 赵宪庚, 徐匡迪

(中国工程院, 北京 100088)

摘要: 材料技术是支撑和保障核工程安全稳定运行的前提和基础。我国现有在役和在建的 56 台核电机组中有 52 台是压水堆, 钠冷快堆和高温气冷堆正在开展示范工程电站的建设, 其他堆型尚处于研究阶段。本文分析了我国新一代核能用材研发、制造、应用过程中存在的共性问题、在役和在建核能工程用材存在的突出问题、在研核能技术用材存在的关键问题, 在此基础上提出了我国新一代核能用材的发展战略建议, 包括设立国家新一代核能用材专业指导委员会; 设立新一代核能用材国家专项基金或长期稳定支持的专项科技计划; 创建我国新一代核能用材先进完整标准体系; 建设国家层面的共享型工程级辐照实验装置; 在独立自主原则下, 继续开展新一代核能用材国际合作等。

关键词: 新一代核能; 压水堆; 核能用材; 发展战略

中图分类号: TL341 **文献标识码:** A

Overall Development Strategy of Materials Used for China's New-Generation Nuclear Power Plants

Gan Yong, Zhao Xiangeng, Xu Kuangdi

(Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Materials and their manufacturing technology are the premise and foundation to support and guarantee the safe and stable operation of nuclear engineering. Among the 56 nuclear power plants in service or under construction, 52 nuclear power plants adopt pressurized water reactors. Demonstration power plants are being built for the high temperature gas cooled reactor and the sodium cold fast reactor, and other reactor types such as molten salt reactors, accelerator-driven subcritical systems, and supercritical water reactors are still in the research stage. This paper summarized and analyzed the challenges and problems in the course of research, manufacturing, and engineering application of materials used for China's new-generation nuclear power plants, and further proposed some strategic suggestions for the development of these materials, including establishing a national steering committee to guide their development; establishing a national research fund to specially support their development; creating an advanced and complete standards system for their development; constructing a national shared engineering-level radiation experimental device; and under the principle of independence, continuing the international cooperation in the related field.

Keywords: new-generation nuclear power plants; pressurized water reactors; materials used for nuclear power plants; development strategy

收稿日期: 2018-12-15; 修回日期: 2019-01-22

通讯作者: 干勇, 中国工程院, 院士, 主要研究方向为冶金材料; E-mail: ganyong@cae.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新一代核能用材发展战略研究”(2016-ZD-06)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

核能主要分为核裂变和核聚变两类。目前人类可驾驭的可控核裂变技术已用于工程建设核电站，为人类提供清洁能源供应。而核聚变技术还处于研发阶段。本文所提到的核能技术主要指的是核裂变技术。

二、我国核能技术的发展现状

核能技术是国家核心竞争力的标志性技术，是战略必争的高科技领域，是军民深度融合发展的战略性新兴产业之一。新中国成立以来，我国核能行业从早期的自力更生、艰苦奋斗到近期的创新驱动发展，走出了一条具有中国特色的“引进、消化、吸收、创新、超越”发展路线。我国已经建立自主和完整的核工业体系，尤其是改革开放以来，我国核能技术研究更是呈现出百花齐放的局面。进入 21 世纪后，我国在引进、消化、吸收世界领先的 AP1000 和 EPR 第三代压水堆核电技术基础上，自主创新研发了同样具有世界领先水平的“华龙一号”和 CAP1400 大型先进压水堆核电技术，其中“华龙一号”国内示范工程已开工建设，且“华龙一号”还成功出口巴基斯坦，国内外首堆建设进展顺利。CAP1400 示范工程已经具备开工建设条件；高温气冷堆和钠冷快堆正在积极推进示范工程的建设；中国科学院先导计划支持下的熔盐堆和加速器驱动（ADS）次临界装置已完成示范工程选址；超临界水堆、行波堆等核能系统正在加强基础研究和工程设计 [1,2]。

压水堆是目前全球最成熟的商业核电技术。20 世纪 80 年代，我国核电确定了以压水堆技术为主的发展路线，迄今我国在运和在建的 56 台核电机组中有 52 台是压水堆，在未来一定发展时期内，第三代大型先进压水堆核电技术将是建设的主力堆型。2016 年 3 月，国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布了《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》（下称《行动计划》），《行动计划》将先进核能技术创新放在显著的位置，明确：当前我国优先发展压水堆核电站，提高建成运行的第二代压水堆核电站的安全性和经济性，引进消化国外第三代压水堆核电技术，开发以“华龙

一号”和 CAP1400 为代表的具有自主知识产权的第三代压水堆核电技术，使我国第三代核电技术全面处于国际领先水平，实现系列化发展。总体上，我国核能产业稳步高效发展，已成为世界核能领域的产业和工程中心。在此基础上，我国将继续大力推进世界核能科技中心和创新高地建设，使我国早日成为世界核能科技强国。

三、我国核能用材发展的现状及问题

新一代核能技术聚焦核能发电技术，涵盖了大型先进压水堆、模块式小型堆、高温气冷堆、快堆、熔盐堆、加速器驱动次临界系统、超临界水堆、行波堆等。

（一）我国新一代核能用材发展现状

近十余年，在有关企业的努力下，尤其在大型先进压水堆和高温气冷堆国家重大科技专项和快堆专项的支持下，我国压水堆、高温气冷堆和快堆的核岛主设备材料技术取得了巨大进步。以压水堆为主体的工程堆核岛主设备材料技术问题已解决，实现了自主化和大规模产业化。这些工程堆核岛主设备材料技术产业链布局已完成，显著提升了我国高端装备制造业的核心竞争力。

熔盐堆等处于研究阶段堆型的主设备材料技术尚处于工业初试或实验室研究阶段。虽然压水堆核燃料已实现了本地化批量生产，但包括压水堆在内的我国所有核反应堆核燃料及材料尚未最终形成自主化，乏燃料后处理过程所需材料技术尚需开展系统的研究。

（二）我国新一代核能用材发展存在的主要问题

1. 新一代核能用材发展存在的共性问题

我国从核能大国向核能强国迈进的主要标志是形成自主创新的、可大规模布置的工程化核能技术，而核能工程化的最关键支撑是材料技术。我国目前尚无新一代核能用材的顶层设计和统筹规划，即没有国家层面的新一代核能用材发展战略规划，严重影响了我国核能用材的自主、高效、有序发展。凝聚共识和全局统筹的新一代核能用材发展战略规划对我国核能产业尽早实现全面自主化和走向世界具有战略性意义。

我国同时开展众多堆型研究,造成核能相关研发力量和资源的分散;同时开展多种方式的第四代堆型研究,并在堆型技术并不十分成熟的情况下急于开展示范工程建设,这必将造成我国非常有限的核工程资源的浪费,也存在潜在的核安全风险。核工程堆技术研究需要巨大的人力和经费投入,应在国家核能发展规划顶层设计中进行协调,以提高我国核工程人力和经费的使用效率。

我国工程级辐照实验装置能力严重不足,制约了核岛材料、核燃料及包壳材料、增材制造材料的快速发展。

乏燃料后处理过程所需材料尚未系统开展研究。“华龙一号”和 AP1000 等压水堆核岛设备分别采用 RCC-M 和 ASME 标准体系,增加了材料研究、设备制造和核安全监管的复杂度和工作量。

2. 工程化建设堆用材存在的主要问题

第三代压水堆核岛主设备结构材料实现了自主化和产业化,但产品质量的稳定性尚需进一步提高。大型先进压水堆核电站主体材料主要为核岛和常规岛的关键设备结构材料,主要包括反应堆压力容器、蒸汽发生器、稳压器、堆内构件、控制棒驱动机构、主管道、主泵、阀门、汽轮机发电机等设备材料。这些材料种类较多,属于品种多、批量小、性能要求极高的材料,涵盖碳钢、低合金钢、不锈钢、铝合金、钛铝合金、镍基合金、高分子绝缘材料等,按品种则有铸锻件、板、管、圆钢、焊材等。可以将大型先进压水堆核电站主体材料分为三大类:一是复杂异形一体化特大型合金钢锻件材料。主要包括反应堆压力容器 SA508-3cl.1 特大锻件、蒸汽发生器 SA508-3cl.2 特大锻件、常规岛汽轮机转子 3.5NiCrMoV 特大锻件。此类材料要求具有合适的强度、优异的低温韧性以及良好的截面均匀性。制备工艺主要为组织细化与稳定化和低温韧性提升的热处理技术、高纯净、高均匀钢锭冶炼控制技术和复杂异形一体化特大锻件的锻造技术。二是异形整体不锈钢大锻件材料。主要包括整体锻造主管道 316LN 奥氏体不锈钢大锻件和压紧弹簧 F6NM 马氏体不锈钢大型环锻件。此类材料要求具有足够的强度、良好的塑性和断裂韧性,特别是要求具有良好的抗应力腐蚀断裂能力,以及良好的抗均匀腐蚀能力和焊接性能。核级不锈钢大锻件材料制备工艺主要为成分精控及高纯净冶炼控制技术、

锻造防开裂控制技术、内孔加工及弯曲控制技术、组织晶粒均匀及均匀变形控制技术等。三是镍基耐蚀合金精密管件材料。主要包括蒸发器 690 合金 U 形传热管,此类材料要求具有良好的抗应力腐蚀断裂的性能、良好的抗均匀腐蚀能力、良好的加工性能(弯管、胀管等)、良好的制管性能和焊接性能。690 合金 U 形管为制管皇冠上的明珠,其制备工艺主要为高均匀、超纯净冶炼工艺,热挤压成型质量控制技术,超长薄壁小口径管材冷加工技术,超长、薄壁、小口径管的在线脱脂控制技术,TT (Thermal Technology) 热处理控制技术等。大型先进压水堆核电站主体材料在服役期内大多承受着高温、高压、流体冲刷腐蚀,甚至是强烈的中子辐照等恶劣条件,有些设备材料要求在 60 年全寿命周期内不可更换。因此对设备材料的性能提出了极其严苛的要求,除了如传统材料要求良好的强韧性匹配、优良的焊接性、冷热加工性能外,有些材料还要求具有优良的抗辐照脆性、优良的抗腐蚀性和耐时效性能以及优异的截面均质性能。

高温气冷堆核岛结构材料基本实现自主化,未来超高温气冷堆耐热材料尚未开展研究,蒸发器传热管和石墨材料的应用性能研究尚需进一步研究。高温金属结构材料是超高温气冷堆技术发展的主要瓶颈。目前高温气冷堆堆芯氦气出口温度为 750 °C,未来超高温气冷堆堆芯氦气出口温度将提高到 900~1000 °C,相应的蒸汽发生器、堆内金属构件、氦-氦中间换热器等耐热材料均需满足高温力学性能和物理性能的要求。镍基耐热耐蚀合金作为高温气冷堆倾向采用的高温金属结构材料,其国产化和自主化研究工作尚未系统开展。我国在早期生产堆和 HTR-10 阶段研发过核石墨,但其尺寸规格、辐照性能、辐照寿命均无法达到目前高温气冷堆技术发展要求,目前高温气冷堆示范工程 HTR-PM 采用的是日本东洋炭素的核石墨产品。近年我国核石墨研发已有了新进展,中钢集团新型材料(浙江)有限公司、方大集团股份有限公司等国内企业正在推进核石墨国产化的工作。

长期以来,我国压水堆和快堆等核燃料及材料受制于国外,近年我国压水堆核燃料取得较大进展,基本上可实现自给,但尚未最终实现完全自主化。虽然高温气冷堆核燃料基本实现自主化,

但产能扩大和性能扩展等问题尚需进一步研究。这些材料研发周期长，需辐照考验并需反复进行工程验证。

3. 研发阶段堆用材存在的主要问题

熔盐堆和 ADS 次临界装置核岛结构材料初步确定了选材，并开展了工业试制，但材料在工程环境下的适用性尚需系统研究。熔盐堆构件，包括压力容器、回路管道、热交换管等，都须在高温、熔盐腐蚀和中子辐照等多重极端环境下长期、稳定、有效工作，很难找到一种满足上述条件的成熟工程材料，因此结构材料是熔盐堆研发过程中的一个非常突出的技术难题。20 世纪 40~60 年代，美国橡树岭国家实验室 (ORNL) 在专门为核动力飞机 (ANP) 和熔盐堆项目 (MSRE) 研发了一种镍基合金，也是世界上迄今为止唯一在熔盐堆服役过的结构合金——Hastelloy N 合金。超临界水堆和行波堆核岛选材尚处于实验室筛选阶段，工程化试制尚未开展。

熔盐堆固态燃料和液态燃料尚处于实验室研发阶段。铅冷快堆、钠冷快堆、超临界水堆和行波堆燃料及包壳材料尚在选材阶段。

4. 核能用材发展存在的政策问题

核能材料（核岛结构材料、核燃料材料、后处理材料）安全可靠要求高，需要特殊考核，研发周期长，资金需求量大，需反复进行工程验证。在现有科研立项（五年计划）体制下，难以连续完整地开展和完成核能材料的全链条研制，以致国产化进程经常半途而废。同样的原因也制约了增材制造等新技术与核能材料技术的结合。

四、促进我国新一代核能用材发展的战略支撑与保障建议

我国同时开展多种堆型研究，造成核能材料、技术研发力量和资源的分散。应加强我国核能技术发展的长远谋划和战略布局，在 2030 年前坚持大型先进压水堆第三代核电技术的主体地位，我国第四代核电技术和未来核能技术的研究开发应统筹规划，有所侧重。应加强科学评估，哪些技术处于基础研究阶段，哪些技术处于应用研究阶段，如何协调推进，需开展充分论证。为此，提出促进我国新一代核能用材发展的战略支撑和保障建议 [3]。

（一）设立国家新一代核能用材专业指导委员会

设立国家新一代核能用材专业指导委员会，该委员会独立于电力企业，由责任科学家、分管部门有关领导组成，其主要任务是根据国家核能中长期发展规划，凝聚行业共识，负责制定国家新一代核能用材发展战略规划，在国家规划层面做到材料先行，从科学、技术、工程、产业四个层面制定新一代核能用材的近、中、远期发展目标及具体任务，并以五年周期对上述中、远期发展目标及具体任务做出动态调整，确保我国新一代核能用材持续、有序、高效发展。

（二）设立新一代核能用材国家专项基金或长期稳定支持的专项科技计划

大型先进压水堆和高温气冷堆国家重大科技专项的实施显著促进了我国核能材料技术的进步和装备制造业核心竞争力的提升。设立独立于电力企业的由国家有关部门运作的国家新一代核能用材发展专项基金或长期稳定支持的专项科技计划，该基金或科技计划的资金来源可由国家财政预算、企业和社会融资组成。通过该专项基金或科技计划支持上述国家新一代核能用材专业指导委员会确定的近、中、远期发展目标及具体任务的持续、有序、高效开展，保障我国新一代核能用材发展的支撑性、连续性、前瞻性、战略性和创新性。这也是实现我国核能技术发展战略规划的关键之一。尤其是在新时代中国“强起来”的特殊国际环境下，通过长期稳定基金或科技专项支持，自力更生，建立具有我国自主知识产权和自主供应保障能力的新一代核能用材体系将越来越重要，对保障我国核工程持续发展具有战略意义。

（三）创建我国新一代核能用材先进完整标准体系

第三代百万千瓦压水堆工程首堆均在我国建设，工程实践过程中大部分核岛主设备材料技术问题是 由我国独立解决或参与合作解决的，积累了宝贵的经验和教训。在 ASME 和 RCC-M 标准和我国现有能源行业标准基础上，我国具备创新一整套新一代核能用材先进标准体系的条件。在确保核安全的前提下，兼顾核能材料标准的先进性和经济性，以适度先进的材料标准规范促进我国核能材料技术及其产品技术的进步和提升，拉升高端装备制

造业的核心竞争能力。形成全国统一的兼顾先进性和成熟性的新一代核能用材完整标准体系（包含材料试验、表征和评价全过程标准），为我国核能技术尽早走出国门，引领世界核能技术发展奠定坚实基础。

（四）建设国家层面的共享型工程级辐照实验装置

工程级辐照试验是我国核能用材研发和工程化的制约性瓶颈问题之一。我国应尽快建设国家层面共享型工程级核材料辐照实验装置（中心），通过优化和提高装置效率，加快材料工程化进程，促进材料创新。从长远看，可考虑把即将到设计寿命期的秦山一期 3×10^5 kW 核电站反应堆改造成工程级实验研究堆。

（五）在独立自主原则下，继续开展新一代核能用材国际合作

在新的国际环境和形势下，首先要继续保持和发扬我国核工业独立自主、自力更生的精神。同时，在国家统筹规划的重大核能工程国际合作项目下，要继续积极开展核燃料材料、乏燃料后处理材料等领域的国际合作。

致谢

衷心感谢团队全体同志的辛勤劳动和贡献。

参考文献

- [1] 中国工程院“中国能源中长期发展战略研究”项目组. 中国能源中长期 (2030、2050) 发展战略研究 (电力、油气、核能、环境卷) [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Chinese Academy of Engineering “China’s Energy Medium and Long-Term Development Strategy Research” Project Team. China’s energy medium and long-term (2030,2050) development strategy research (electricity, oil and gas, nuclear energy, environmental volume) [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2011.
- [2] 中国工程院“我国核能发展的再研究”项目组. 我国核能发展的再研究 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
Chinese Academy of Engineering “Re-study on the Development of Nuclear Energy in China” Project Team. Re-study on the development of nuclear energy in China [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015.
- [3] 中国工程院“新一代核能用材发展战略研究”项目组. 新一代核能用材发展战略研究报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2018.
Chinese Academy of Engineering “The Development Strategy Research for New Generation of Nuclear Energy Materials” Project Team. The development strategy research report for new generation of nuclear energy materials [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2018.