

核电机组调峰运行对燃料完整性的影响分析

谭 涵

中广核苍南核电有限公司 浙江 温州 325000

摘要：本文深入剖析核电机组调峰运行对燃料完整性的影响。阐述调峰运行定义与类型，明确核燃料完整性重要性及影响因素。研究发现，调峰运行对核燃料利用率具双重效应，会影响燃料组件安全性，且与核废料产量密切相关。通过分析提出优化调峰策略及多电源联合调峰模式，为保障核电机组安全、高效调峰运行提供理论依据与实践参考。

关键词：核电机组；调峰运行；燃料完整性；影响分析

1 核电机组调峰运行概述

1.1 调峰运行的定义

在电力系统中，电力负荷时刻处于动态变化过程，白天工业生产、居民生活用电量大，夜间用电量则显著降低。为了维持电力供需的实时平衡，保障电网稳定运行，发电机组需要具备根据负荷变化灵活调整输出功率的能力，这种调整输出功率以适应负荷波动的运行方式，便是调峰运行。对于核电机组而言，调峰运行是指核电机组根据电网负荷的变化，在一定范围内调整其发电功率的运行模式。与传统火电、水电等常规发电机组相比，核电机组的调峰运行具有独特性。常规火电机组可通过增减燃料供给量快速改变功率输出；水电机组能凭借调节水流量灵活调整发电功率^[1]。然而核电机组基于核裂变反应产生热能，其功率调整过程需兼顾核反应堆的安全稳定运行，涉及复杂的物理、化学和热工水力过程，因此调峰操作更为谨慎且技术要求更高。在调峰运行过程中，核电机组不仅要满足电网对电力供应的动态需求，还必须严格遵循核安全法规和技术标准，确保核反应堆的可控性、安全性和可靠性。

1.2 核电机组调峰运行的类型

核电机组调峰运行主要分为三种类型：基荷运行下的有限调峰、负荷跟踪运行和频繁启停运行。基荷运行下的有限调峰是较为常见的一种方式，核电机组通常在接近满功率的状态下运行，作为电力供应的基础负荷，以充分发挥其高效、稳定的发电优势。但当电网负荷出现较小波动时，核电机组也可在一定范围内进行功率调整，一般调峰幅度控制在额定功率的±10%-20%左右。这种调峰方式对核反应堆的运行工况影响相对较小，能够在保障核安全的前提下，适度参与电网调峰，同时维持较高的发电效率。负荷跟踪运行则要求核电机组具备更强的功率调节能力。在此模式下，核电机组需根据电网

负荷的实时变化，频繁且大幅度地调整发电功率，调峰范围可达额定功率的30%-80%。为实现这一目标，核电机组需要采用先进的控制技术和设备，如控制棒的精确控制、冷却剂流量调节等，以快速响应负荷变化，维持核反应堆的稳定运行。负荷跟踪运行能够更好地适应现代电网对电力供应灵活性的需求，但也对核电机组的设备性能、控制系统以及运行人员的操作水平提出了更高要求。频繁启停运行是一种极端的调峰方式，核电机组根据电网负荷需求，频繁地启动和停止运行。这种调峰方式对核电机组的损害较大，且启动过程中需要消耗大量时间和能源，同时增加了核安全风险。因此频繁启停运行一般仅在特殊情况下采用，如电网遭遇重大事故或特殊电力需求时期，在其他调峰方式无法满足要求时才会考虑启用。

2 核燃料完整性的重要性及影响因素

2.1 核燃料完整性的定义

核燃料完整性是核电机组安全稳定运行的核心要素，它贯穿于核反应堆运行的全生命周期，维系着核能系统的安全与效能。其定义涵盖了核燃料在反应堆严苛运行环境中，始终保持物理和化学性质的稳定状态，确保核燃料芯块、包壳等关键部件不发生破损或失效，从而构筑起防止放射性物质泄漏到反应堆冷却剂系统及环境中的坚固屏障。核燃料芯块通常由二氧化铀等核材料经过精密加工制成，作为核裂变反应的核心区域，它承载着释放核能的关键使命。而包壳紧密包裹在芯块外部，不仅起到隔离核燃料与冷却剂的作用，更像忠诚的卫士，时刻抵御着外部复杂环境的侵蚀，防止放射性物质外泄^[2]。核燃料完整性涵盖多个关键层面，从物理完整性角度看，在高温、高压和中子辐照等复杂且极端的环境考验下，核燃料芯块必须保持结构稳定，不能出现破碎、肿胀变形等情况，唯有如此，才能维持正常且高效

的核裂变反应持续进行。从化学完整性方面而言，核燃料与包壳材料以及冷却剂之间必须保持化学性质的相容与稳定，避免发生剧烈的化学反应，因为一旦包壳遭受腐蚀穿孔，放射性物质就会失去屏障的保护，造成难以预估的泄漏风险。一旦核燃料完整性遭到破坏，带来的危害是多维度的，不仅会使核电机组的发电效率大幅降低，更可能引发严重的核安全事故，对人员健康和生态环境造成不可估量、难以逆转的危害，甚至会引发公众对核电安全性的信任危机。

2.2 影响核燃料完整性的因素

影响核燃料完整性的因素众多，主要可归纳为运行工况、材料性能和外部环境三个方面。运行工况是影响核燃料完整性的关键因素，核反应堆运行过程中的温度、压力和中子通量分布直接关系到核燃料的性能。在高温条件下，核燃料芯块会发生热膨胀和相变，若温度过高或温度变化过于剧烈，可能导致芯块破碎；高压环境下，包壳承受的应力增大，长期处于高压状态可能引发包壳的塑性变形甚至破裂。中子通量的不均匀分布会使核燃料各部分的燃耗程度不同，进而产生局部应力集中，威胁核燃料的完整性。材料性能对核燃料完整性也起着决定性作用，核燃料芯块和包壳材料的物理化学性质直接影响其在反应堆内的服役性能。核燃料芯块的密度、晶粒结构等特性会影响其热导率和裂变气体释放率；包壳材料的耐腐蚀性能、力学强度以及与核燃料的相容性等，决定了包壳在复杂环境下的防护能力。例如，锆合金是目前广泛应用的核燃料包壳材料，其良好的耐高温、耐腐蚀性能以及较低的中子吸收截面，对保障核燃料完整性发挥着重要作用，但在特定工况下，仍可能面临腐蚀和氢脆等问题。外部环境因素同样不可忽视，冷却剂的化学成分、流量和杂质含量等都会对核燃料产生影响。冷却剂中的溶解氧、氯离子等杂质可能加速包壳材料的腐蚀；冷却剂流量的不稳定会导致核燃料局部冷却不足，引发温度异常升高。另外，地震、海啸等自然灾害以及人为操作失误等外部事件，也可能对核燃料完整性构成威胁，例如地震可能导致反应堆结构变形，使核燃料受到机械损伤。

3 核电机组调峰运行对燃料完整性的影响分析

3.1 调峰运行对核燃料利用率的影响

核电机组调峰运行对核燃料利用率存在双重影响。一方面，调峰运行可以在一定程度上提高核燃料的利用率。在负荷跟踪运行等调峰模式下，核电机组根据电网负荷变化调整功率，能够更合理地匹配电力需求，避免了基荷运行时因电力过剩而造成的能源浪费。通过优化

调峰策略，可使核反应堆在不同功率水平下更充分地利用核燃料的裂变潜能，延长核燃料的使用寿命。例如，采用先进的功率调节算法，在低负荷运行阶段适当调整控制棒位置和冷却剂流量，能够提高中子通量分布的均匀性，减少局部核燃料的过度燃耗，从而提升整体核燃料利用率。另一方面，调峰运行也可能降低核燃料利用率，频繁的功率调整会导致核反应堆运行工况频繁变化，引起核燃料的热应力和机械应力波动。在功率上升和下降过程中，核燃料芯块和包壳会经历温度和压力的剧烈变化，这可能导致芯块与包壳之间的相互作用加剧，产生磨损和变形，影响核燃料的正常反应。调峰运行过程中的功率波动还可能引发裂变气体释放量的增加，部分裂变气体在芯块与包壳之间积聚，形成气隙，降低了热传导效率，使得核燃料无法充分吸收裂变产生的热量，从而降低核燃料利用率。

3.2 调峰运行对燃料组件安全性的影响

核电机组调峰运行对燃料组件安全性有着显著影响。在调峰过程中，尤其是大幅度的功率变化，会使燃料组件承受复杂的热-机械应力。当核电机组功率上升时，核燃料的裂变反应加剧，产生更多的热量，导致燃料组件温度迅速升高，包壳承受的热应力增大；功率下降时，温度快速降低，热应力方向发生改变。这种频繁的热应力循环容易使包壳材料产生疲劳裂纹，随着运行时间的增加，裂纹可能逐渐扩展，最终导致包壳破损，威胁燃料组件的安全性^[3]。同时，调峰运行还会影响冷却剂在燃料组件内的流动特性，功率变化会导致冷却剂流量和温度分布发生改变，在低功率运行时，冷却剂流量减少，可能出现局部冷却不足的情况，使得燃料组件部分区域温度过高；而在功率快速上升阶段，冷却剂流量的增加如果不能及时跟上热量产生的速度，同样会造成局部过热。这些情况都会增加燃料组件发生临界热流密度（CHF）的风险，一旦发生CHF，燃料包壳表面的冷却膜破裂，导致包壳温度急剧升高，严重时会引发包壳熔化，破坏燃料组件的完整性和安全性。

3.3 调峰运行对核废料产量的影响

核电机组调峰运行与核废料产量之间存在密切关联。从理论上讲，调峰运行通过优化核燃料的利用，在一定程度上可以减少核废料的产生。当核电机组采用合理的调峰策略，更均匀地利用核燃料的裂变能力，使核燃料在堆内的燃耗更加充分，能够降低单位发电量的核燃料消耗，从而减少新产生的核废料总量。然而，在实际运行中，调峰运行也可能导致核废料产量增加。频繁的功率调整会使核燃料的运行工况变得复杂，引发更

多的裂变产物生成和释放。功率波动过程中，核燃料芯块内部的裂变气体释放加剧，部分裂变产物会随着裂变气体进入冷却剂系统，增加了冷却剂中放射性物质的含量，进而导致放射性废物处理量的增加，调峰运行对燃料组件的损伤可能会加速核燃料的老化和破损，使得更多的放射性物质泄漏到冷却剂中，进一步提高了核废料的产量。

4 核电机组调峰运行优化策略

4.1 调峰运行策略的优化设计

优化核电机组调峰运行策略是保障燃料完整性和提高调峰性能的关键。首先，需要建立精确的核反应堆动态模型。该模型应综合考虑核物理、热工水力、材料性能等多方面因素，能够准确模拟核反应堆在不同调峰工况下的运行特性。通过对模型的仿真分析，可以深入研究功率变化速率、控制棒动作规律、冷却剂流量调节等参数对核燃料完整性和机组性能的影响，为制定合理的调峰策略提供理论依据。其次，采用先进的控制算法实现调峰过程的精确控制，传统的控制方式难以满足现代核电机组调峰运行的复杂需求，而基于人工智能和智能控制理论的算法，如模型预测控制（MPC）、模糊控制等，能够根据电网负荷变化和核反应堆实时运行状态，快速、准确地调整控制参数。另外，还应优化调峰运行的功率变化曲线。通过对历史运行数据的分析和实验研究，确定不同工况下核电机组功率上升和下降的最佳速率和曲线形状。避免功率的急剧变化，采用渐进式、分段式的功率调整方式，使核反应堆有足够的时间适应工况变化，降低热-机械应力对核燃料和燃料组件的影响，保障核燃料完整性。

4.2 多电源联合调峰模式的应用

多电源联合调峰模式是提升核电机组调峰能力和保障电网稳定运行的有效途径。在现代电力系统中，多种类型的电源相互配合，包括火电、水电、风电、太阳能发电以及储能系统等。将核电机组与其他电源进行合理组合，能够充分发挥各类电源的优势，弥补核电机组调峰能力的不足。与火电联合调峰时，火电机组具有快

速响应负荷变化的特点，可在电网负荷急剧波动时，迅速增加或减少发电功率，承担主要的调峰任务。而核电机组则保持相对稳定的运行状态，在一定范围内进行有限调峰，作为电力供应的稳定基础。这样既能满足电网对调峰灵活性的需求，又能确保核电机组的安全稳定运行，减少调峰对核燃料完整性的影响。水电作为清洁、灵活的能源，与核电机组联合调峰也具有很大潜力，水电厂可以根据电网负荷需求，快速调节水轮机的出力，实现发电功率的快速变化^[4]。在核电机组调峰能力不足时，水电可以及时补充电力缺口；当核电机组需要降低功率时，水电可相应增加发电功率，维持电网的功率平衡。随着风电和太阳能发电等可再生能源在电力系统中的占比不断提高，储能系统的作用愈发重要。将储能系统与核电机组相结合，在电网负荷低谷时，利用核电机组的富裕电力进行储能；在负荷高峰或核电机组调峰困难时，释放储能系统的电能，辅助核电机组进行调峰。这种多电源联合调峰模式能够有效提高电力系统的灵活性和稳定性，同时降低核电机组调峰运行对燃料完整性负面影响。

结束语

本文系统研究核电机组调峰运行与燃料完整性关系，揭示调峰运行对燃料多方面影响，提出优化策略。研究成果对保障核电机组安全稳定运行、提升电网调峰能力意义重大。未来，随着电力系统发展，需持续探索更先进技术与模式，进一步降低调峰运行对燃料完整性负面影响，推动核电行业安全、高效、可持续发展。

参考文献

- [1] 夏军宝,罗英.核电机组参与电网调峰研究综述[J].东北电力技术,2025,46(6):35-37,41.
- [2] 谭杰,罗俊杰,吴迪,等.核电机组调峰工况的技术要求及堆芯控制策略的探讨[J].科技视界,2022(22):33-36.
- [3] 余加喜,莫若慧,毛李帆,等.核电机组参与调峰的双市场联合经济调度研究[J].广东电力,2020,33(2):63-70.
- [4] 邵思奇,邵和平,刘艳梅,等.核电与多源调峰电源联合调度策略研究[J].东北电力技术,2024,45(11):7-16.