

国外快堆乏燃料后处理发展状况及机械首端工艺调研

王日腾 董碧波 郑卫芳 朱玲凡
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要: 与压水堆乏燃料组件不同,快堆乏燃料组件燃料棒束外包装着一层不锈钢六角形外套管,这造成了快堆乏燃料机械首端工艺和剪切设备的设计与压水堆乏燃料组件处理方式有着本质的区别。不同的处理工艺决定了剪切设备。本文对法国、英国、日本和印度等处理快堆乏燃料组件机械首端工艺进行调研,发现这些国家均采用先脱除外套管,再切割燃料棒束或燃料单棒的工艺,其中法国采用机械方式脱除外套管,英国和印度采用激光脱除外套管,日本在对比了激光和机械脱除外套管两种方式后,推荐采用机械脱除外套管在解体燃料细棒的方法。相比于燃料组件整束剪切,上述工艺可以极大地降低对机械设备强度的要求,并减少大量元件包壳通过后续处理工艺设备,降低了输送过程中的风险。

关键词: 快堆乏燃料;机械首端;剪切设备;外套管

0 引言

为提高铀资源利用率、减少高放废物的产生量,我国《核电中长期发展规划 2005—2020》提出按照热中子反应堆(以下简称“热堆”)→快中子反应堆(以下简称“快堆”)→聚变堆“三步走”的发展战略。在此战略规划中,以热堆(主要为压水堆)和快堆为主的核裂变能将处于长时期的发展阶段,快堆作为压水堆的后续发展堆型,可能在 50 年后逐步成为我国核能发展的主力堆型。

我国核裂变能的发展战略,决定了我国必然走核燃料闭式循环的技术路线,这与俄罗斯、英国、法国、日本和印度等国的路线一致。核燃料循环闭式有两条路径:一是热堆核燃料闭式循环,指从热堆乏燃料中分离出 U 和 Pu,制成混合氧化物燃料(MOX 燃料)再回到热堆循环利用;二是快堆核燃料闭式循环,指从热堆和快堆乏燃料中分离出 U 和 Pu,制成混合氧化物燃料(MOX)或合金燃料再进入快堆循环。

建立快堆核燃料闭式燃料循环体系的关键环节是快堆乏燃料后处理,也是技术最复杂的环节。快堆乏燃料后处理的第一道工序是机械首端对燃料组件的解体,因快堆燃料组件与压水堆燃料组件的结构、材料存在较大差异,因此机械首端工艺的研究是突破快堆乏燃料后处理技术的第一道屏障。压水堆燃料棒外无包覆层,燃料包壳为相对脆性的锆合金材料,机械解体的操作难度和材料破坏的强度相对低;而快堆燃料组件燃料段部分,内层为按一定规则排列的燃料细棒,外部有一层不锈钢六角形外套管包覆,机械解体的工艺步骤难

度和材料破坏的强度都明显增加。目前,我国还没有建设针对快堆乏燃料组件进行后处理的设施,因此有必要参考借鉴国外快堆乏燃料后处理发展较早国家的经验,避免少走弯路。

国际上,针对快堆乏燃料后处理的文献报道较少,机械首端工艺的研究报道更是少之又少。本文在有限资料的基础上汇总了英国、法国、日本和印度等国家的快堆乏燃料后处理发展状况及机械首端研究情况,对我国快堆乏燃料后处理机械首端工艺及设备的研究具有一定的借鉴意义。

1 英国

20 世纪 50 年代末期,英国在苏格兰唐瑞建立实验快堆核燃料循环设施,用于处理唐瑞快堆(Dounreay Fast Reactor, DFR)燃料,处理的燃料:燃耗深度为 0.8%、冷却时间为 120 天,成分为 30% 加浓铀-0.5% 铬合金金属燃料。1972 年在唐瑞后处理厂启动对 DFR 燃料的处理,到 1978 年共处理了冷却时间为 90 天的高浓缩铀 10t。同期,为了处理原型快堆(Prototype Fast Reactor, PFR)辐照后的混合氧化物燃料,英国将唐瑞后处理厂大范围地进行了改建和扩充,1980 年新的燃料组件解体设施和废物处理设施投入使用,于同年 8 月份第一次处理 PFR 混合氧化物燃料。

在处理辐照过的 PFR 燃料时,其机械首端采用激光解体组件和去除外套管,然后对燃料细棒进行剪切的工艺,具体步骤如下。

步骤一:在组件解体热室中用激光切割组件的上下两端,包括操作头、上屏蔽段及管脚,只保留燃料段部分;

步骤二：采用蒸汽清洗去掉头尾的组件，除去残存在外套管上的钠；

步骤三：将清洗后的燃料段部分送到解体热室，用激光切割除去六角形外套管，通过液压牵引台把细燃料棒从格栅中抽出，最后切成2~4cm长的小段。

上述整个工艺过程实际运行十分成功。英国的设计有两点值得关注：

(1) 采用先去除六角形外套管，再对燃料细棒进行剪切的方式，此种工艺降低了组件整体剪切的难度，进而降低了剪切设备的研制难度，相关设备可在压水堆组件剪切设备的基础上适应性改造即可；

(2) 步骤一和步骤三中，组件解体时去除的非燃料段部分采用激光切割的方式。在印度、日本的研究过程中提出，此方式比机械解体效率更高，但需重点关注不损坏其内部的燃料元件。

2 法国

20世纪70年代，法国阿格厂AT-1设施对快堆燃料进行了处理，之后马尔库尔中间工厂、UP2厂均对凤凰堆堆芯燃料进行了后处理。1983年，法国开始启用快堆氧化物燃料后处理厂（TOR新中间工厂）对快堆燃料组件进行处理。

2.1 AT-1设施

位于阿格的AT-1设施（1969年~1978年），是法国第一座用于钠冷快堆乏燃料后处理的设施，用于处理狂想曲堆和凤凰堆的燃料。AT-1设计的处理目标为：日处理能力1kg/d，燃料组件的燃耗深度为40~120GWd/t，冷却时间为6~24个月。运行期间，AT-1共处理了约1t最大燃耗为120GWd/t的混合氧化物燃料，实现了狂想曲燃料的闭式循环，还处理了超过150kg来自凤凰堆的混合氧化物燃料。

2.2 HAO设施

UP2-400后处理厂于1966年建成，最初只适用于石墨气冷堆乏燃料的后处理，1969年法国选定压水堆为核电站使用堆型后，在阿格厂增建了高放氧化物首端（HAO）设施，使阿格厂也能处理氧化物乏燃料。HAO设施使用的是立式送料水平剪切的工艺，即元件进入热室后，由立式料筒将整束组件送入入料口，剪切刀具采取水平移动的方式剪切燃料段。该设施能够剪切多种燃料元件（压水堆、沸水堆和凤凰快堆元件）。据不完全统计，1978年~1984年间该设施处理了约11t的凤凰堆燃料。

2.3 SAP、TOR快堆后处理设施

SAP设施位于马尔库尔，用于处理快堆氧化物燃料。1973年~1983年，共处理了来自狂想曲堆、KNK堆和凤凰堆的MOX快堆乏燃料约8t，燃

料燃耗深度为35~105GWd/t，燃料的冷却时间为10~50个月，具体情况如下：1975年处理了第一批约50kg高燃耗的狂想曲堆燃料；1976年处理了德国KNK堆的1650kg低燃耗的燃料；1977和1978年处理了2.3t凤凰堆燃耗较深的浓缩铀燃料，这些燃料的燃耗深度约为55000~76000MWd/t，冷却时间大于1年，到1981年7月，其共处理了近3t凤凰堆燃料，生产运行能力约为10~20kg/d的处理量。

TOR设施由SAP设计扩建改造而成，包括了首端溶解、后段萃取分离流程的工艺设施。其设计年处理能力为5t快堆燃料（重金属），运行期间（1988~1997年），处理了来自KNK堆和凤凰堆的MOX快堆乏燃料约7t，燃耗为60~103GWd/t，燃料的冷却时间为3~10年。

3 欧洲联合后处理示范厂

20世纪80年代，英法两国成立联合研究团队，着手共建欧洲联合后处理示范厂，该厂的处理对象可涵盖欧盟所有堆型的乏燃料元件。在快堆燃料元件处理上，双方达成的工艺路线为：采取先将燃料组件解体，然后对单根燃料棒进行剪切的方式；对于燃料组件解体方案，法国建议不采取激光切割而使用机械切割的方式脱除六角形外套管，已避免内部燃料棒受损和放射性微粒扩散。

组件解体部分提出以下两种具体方案：（1）组件在垂直状态下，用高频电加热方式进行外套管的横向切割，同时去除操作头、上屏蔽段等部分，然后对单棒进行剪切；（2）在加热外套管的同时，融化燃料细棒上的金属绕丝，在其上形成脆裂裂纹，这些裂纹在外套管上实际构成横向和纵向的裂口，使得外套管和燃料棒完全分离，此方案在凤凰堆乏组件切割试验验证中取得了比较理想的效果。

4 日本

4.1 核燃料循环研究设施（Recycle Equipment Test Facility, RETF）

1955年，日本原子能研究开发机构在东海村后处理厂附近建造RETF设施，目的是在工程规模上验证快堆核燃料后处理的每个操作步骤，处理对象为文殊快堆堆芯和增殖区、常阳快堆的转换区的燃料。机械首端工艺如下：

（1）用CO₂激光发射器作为解体设备对乏燃料组件外套管、入口喷嘴等进行切断，并去除出燃料棒之外的其他结构件，与机械式切断方式相比，采用激光切割方式能实现高速解体，且激光束沿着组件的方向

移动的操作方式可以实现解体机构紧凑化；

(2) 燃料棒束剪切采用卧式送料、刀具水平剪切的操作，燃料棒束剪切长度为 2cm 左右。

4.2 快堆燃料循环技术 FACT 发展项目

FACT 项目始于 2006 年，由日本原子能机构 JAEA 与日本电业合作开发。该项目首端解体和剪切工艺的发展目标是：确保解体系统能够稳定控制，以减少对燃料棒的损坏；确保剪切系统能够很好控制剪切长度，减少燃料破损成粉末的比例；能够有效处理组件和燃料棒束，确保解体和剪切操作的连续性。

5 印度

印度快堆乏燃料后处理技术的开发分为 4 个阶段：第一阶段主要为工艺和设备的研发，目的是改进 PUREX 流程和研发专用设备；第二阶段是 CORAL 试验设施的建造和运行，即快堆计划，以 1985 年在英迪拉·甘地原子研究中心 (IGCAR) 的快中子增殖实验堆 (Fast Breeder Test Reactor, FBTR) 调试为开端；第三阶段是示范快堆燃料后处理厂 (Demonstration Fuel Reprocessing Plant, DFRP) 的建造和运行，该厂建设目标是以工业生产的规模可靠运行，为快堆燃料后处理提供经验；第四阶段是原型快堆 (PFR) 乏燃料商业后处理厂 (Fuel Reprocessing Plant, FRP) 的设计、建造和运行。

印度针对快堆燃料组件的解体和剪切，在 CORAL 设施采用的是激光解体和单棒剪切的工艺。其开发的激光解体设备，在设计和运行中的难点在于，除去不锈钢外套管的同时需保证不损伤内部燃料元件棒。该设备已成功解体了多个 FBTR 乏燃料组件，印度以此为基础设计了用于 PFR 燃料组件的解体机，该解体机同时配备了机械切割锯作为备用。其采用水平剪切方式，基于设备的运行经验，经过优化改进的剪切机已用于 DFRP 热室内，并能够剪切 3 种不同尺寸的 FBTR 燃料棒。为了满足第四阶段快堆燃料后处理厂的处理要求，印度设计了专用剪切设备用于剪切 PFBR 燃料组件。

6 结语

通过对国外后处理发展较早或投入研发资源较多国家的调研可知：

(1) 英国、法国在快堆乏燃料后处理方面积累了丰富的工程实践经验；日本、印度对快堆乏燃料的后处理目前尚处于研究阶段。但这四个国家在机械首端工艺的选择上，均采用了先解体燃料组件，再进行燃料棒或燃料棒束剪切的路线。此剪切工艺与压水堆燃料组件剪切工艺类似，可作为我国快堆后处理机械首端工艺路线的参考。

(2) 在解体工艺部分，激光解体和机械解体均有成功应用的经验，但从放射性安全及设备可靠性等方面考虑，更多国家倾向于选择机械解体。

(3) 试验室规模的研究方面，由于对处理能力要求相对较低，因此多采取燃料单棒剪切的方式；在工业规模应用方面，需考虑处理能力与后续化学工艺的配套等，多采取成束剪切的方式。

参考文献：

- [1] 林金海. 国外快堆燃料后处理概况 [J]. 原子能科学技术, 1987(04):508-516.
- [2] H. Ojima, S. Asazuma, H. Kashiara, et al. Dissolution test for sheared pins[R]. PNC-TN8410-87-101.
- [3] A. Togashi, S. Nemoto, et al. Recycle test for FBR fuel in CPF[R]. PNC-TN-8410-93-283.
- [4] 状况与工艺调研报告 (法国) [R]. 中国核科技信息与经济研究院, 2004.
- [5] Lee D. Trowbridge, Guillemo D. DEL CUL, Emory D. COLLINS. Application of advanced head end reprocessing concepts to a fuloride volatility flowsheet[C]. Proceedings of GLOBAL, 2005.

作者简介：王日腾 (1987.02-)，男，汉族，山东招远人，硕士研究生，助理研究员，研究方向：乏燃料后处理。