

AFA 3G 及其它高性能燃料组件

杨晓东

(宜宾核燃料元件厂技术处, 四川 宜宾 644000)

摘要:文章着重介绍了国际上大规模入堆的高性能 AFA 3G 燃料组件的设计特点和制造特点、Performance+ 组件的设计特点及目前正开发的其它高性能燃料组件。介绍了高性能燃料组件的使用现状, 并对我国压水堆高性能燃料的发展提出了一些建议。

关键词:燃料组件; 骨架; 燃料棒; 管座; 格架

中图分类号: TL352.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2003)S0-0015-06

AFA 3G and Other Designs of High Performance Fuel Assemblies

YANG Xiao-dong

(Yibin Nuclear Fuel Element Plant, Yibin 644000, China)

Abstract: The paper presents features of high performance fuel assemblies such as AFA 3G and Performance+ which are underway of developing currently in views of design and manufacture while discussing on the application status of such fuel assemblies, and gives some opinions on the high performance fuel assemblies for PWRs in China.

Key words: fuel assembly; skeleton; fuel rod; nozzle; grid

目前, 世界上各主要商业核电站均以提高燃耗和核电经济效益作为营运目标。面对用户对未来燃料的需求, 世界各主要的核燃料公司积极开发新型高性能燃料组件, 它们的特点^[1]如下: 1) 长循环, 循环长度为 18 个月或 24 个月; 2) 高燃耗, 组件批运行燃耗(以金属 U 计, 全文同)达到 55 GW·d/t, 甚至更高; 3) 高可靠性、安全性, 每一循环中的冷却剂活性小于 0.018 5 GBq/t, 实现燃料棒零破损, 且在整个寿期内不发生影响运行和燃料吊装的弯曲变形; 4) 运行的灵活性, 主要是循环长度具有灵活性, 避免用电高峰时进行大修; 5) 减少乏燃料贮存量; 6) 延长电厂寿命, 采用低泄漏燃料

管理; 7) 降低燃料制造成本。

AFA 3G(简称 3G)正是适应这些需要的 AFA 新型燃料组件, 是目前世界上投入商业运行的高性能燃料组件之一。3G 包括了 AFA 2G(简称 2G)所有技术上的优点并进一步发展(图 1a, 外形尺寸与 2G 相容), 法国安全当局批准的批平均燃耗为 47 GW·d/t, 但实际上, 3G 燃料组件可承受燃耗为 60 GW·d/t。

1 AFA 3G 燃料组件

1.1 设计特点

相对于 2G 燃料组件, 3G 在设计上有如下

收稿日期: 2003-01-20; 修回日期: 2003-03-31

作者简介: 杨晓东(1969—), 男, 四川阆中人, 高级工程师, 在读硕士研究生, 材料科学专业

特点。

1) 提高燃料组件的燃耗,为此,相应提高燃料棒 UO_2 芯块的富集度。燃料管理方案为 68 组组件换料时, UO_2 芯块 ^{235}U 富集度为 4.45%。除 UO_2 芯块富集度变化外,燃料芯块无变化。

2) 燃料棒的改进。为达到高卸料燃耗,燃料包壳必须在很高的辐照水平下仍保持其机械完整性,并具有安全裕量。燃料包壳采用 M5 合金,它是含 1%Nb、0.13%O 的钼合金,其包壳管采用特殊的轧制工艺和 580 °C 中间和最终退火温度,形成 100%再结晶,等轴的晶粒,晶粒尺寸约为 3~5 μm ,第二相粒子 βNb 尺寸为 50 nm, $\text{Zr}(\text{NbFe})_2$ 尺寸为 100~200 nm,均匀化弥散于基体内,形成热力学稳定的结构,从而使它具有良好的性能^[3]。与优化低锡 Zr-4 合金相比, M5 合金包壳抗腐蚀性能增加了 3 倍,氢化降低 6 倍,辐照生长降低 2 倍,包壳管蠕变降低 3 倍,试验燃料棒的最高燃耗超过 70 $\text{GW} \cdot \text{d}/\text{t}$ 。燃料棒加长 15.6 mm,气腔长度增加约 10%,充氮压力由 3.1 MPa 变为 2.0 MPa。燃料棒内腔留有足够的空间供燃料芯块生长和容纳裂变气体。燃料组件两端留有足够的空间供燃料棒在高燃耗下生长而不致与上、下管座发生干涉。此外,燃料棒端塞的设计优化更易拉棒。

3) 采用再结晶优化的 Zr-4 合金变径管即 MONOBLOC™ 型导向管,将 2G 的导向管加大、加厚,增强缓冲段,外径上下段相同。这些改进增加了燃料组件结构刚度和强度,在缓冲段控制棒与导向管之间的摩擦降低了 1 倍,从而确保了控制棒落棒时间和末速度要求。

4) 采用中间搅混格架(MSMG),除了原有的 8 个结构格架外,在组件功率密度最大的 4、5、6 跨间增加了 3 个带搅混翼的中间搅混格架(MSMG),从而增加偏离泡核沸腾(DNB)裕量。提高反应堆运行裕量,并为新的堆芯装载方式提供了附加灵活性。条带材料由消除应力的 Zr-4 合金变为再结晶的 Zr-4 合金。

5) 采用 TRAPPER™ 型防碎屑装置和低压降的上、下管座。根据反应堆运行经验的反馈,在 3G 上采用了 TRAPPER™ 防屑装置,对

大于 3.3 mm 的碎屑具有 100% 的有效阻挡作用。此外,下管座与防屑内部加强筋条形成的空腔可防止碎屑逃出管座,避免进入组件间空隙。3G 的上管座匹配板厚度减少 2.15 mm,总高度下降了 2.55 mm(不包括压紧弹簧高度),以减少压降;流水孔的改变可降低水阻力 6%;压紧板弹簧力的减小可减少组件轴向压紧力和在堆内可能的变形。下管座变矮,以减少压降;孔系变化,使得水阻力降低 20%;防碎屑装置加在匹配板上,厚度由 0.44 mm 增至 3.00 mm,材料由因科镍 718 改为 A286 钢。

6) 采用含钷可燃毒物燃料棒。高燃耗必须采用更高富集度的 UO_2 燃料。在 3G 组件内设置了 Gd 可燃毒物棒,以平衡核反应性。这种 $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-UO}_2$ 芯块的钷含量最高为 10%。一次换料约需 1 000 根棒。

1.2 制造特点

1) M5 合金包壳管的焊接。M5 合金的电子束、氩弧焊接是一技术难点^[3]。宜宾核燃料元件厂(YFP)在引进 3G 制造技术时,法玛通专家曾反复强调 M5 合金焊接的腐蚀问题,尤其是焊接过程中清洁度要求极高。

2) MONOBLOC™ 导向管与格架的电阻点焊是 3G 组件制造上的重要特点。由于该导向管是变径的,厚壁的导向管与格架点焊比较困难,点焊后熔合区的熔核不规则。

3) 3G 骨架的导向管与螺纹套管连接方式改为胀接,是组件制造上又一特点。胀接平面度、胀形鼓包的位置、胀接变形量和胀接后骨架的长度直接影响骨架的最终产品质量。

4) 3G 下管座的制造,由焊接件改为整体机械加工件,以减少变形量。它的难点在于合理地安排机加工工序,以保证最终成品各种尺寸的高精度要求,尤其是管座连接板导向管孔位置度的要求。

5) MSMG 格架的制造难点在于条带组装修工序和激光焊接工艺。条带组装的先后顺序不合理易造成格架尺寸外围尺寸难以保证和搅混翼倾斜过度。格架激光焊的工艺参数不适当易引起焊缝腐蚀、过烧、烧穿等问题。

6) 含钷燃料棒的制造难点在于含钷芯块,它需要特殊的混料技术,需经湿氢长时间烧结。

2 P+燃料组件

P+组件示于图 1b。担保的燃料组件平均卸料燃耗为 55 GW·d/t(棒最高 75 GW·d/t)。

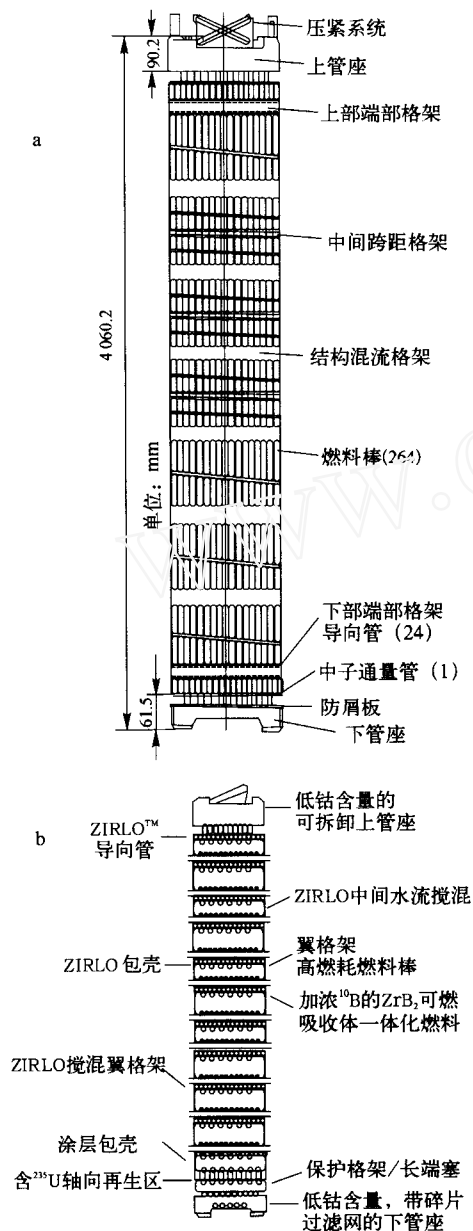


图 1 3G 17×17(a)和 P+ 燃料组件(b)的设计特点

Fig. 1 Design features of 3G 17×17(a) and P+ assemblies(b)

2.1 燃料棒的改进

1) 包壳管、结构材料。包壳管和结构材料采用成熟的 Zirlo 合金。Zirlo 合金是含 Zr、1% Nb、0.1% Sn 和 Fe 的锆合金。与低锡 Zr-4 合金相比,该合金的水侧腐蚀减少了 50%,辐照

蠕变降低了 20%,燃料棒的辐照生长减少了 60%,在高 LiOH(70×10^{-6})溶液中的腐蚀率降低 2~5 倍,适用于高燃耗和长循环。组件中包壳材料导向管和定位格架(包括跨间搅混格架)均采用 Zirlo 合金。Zirlo 已有丰富的使用经验。

2) 燃料棒采用先进棒(AFR)设计(图 2)。燃料芯块采用较小的芯块高径比(约为 1.1~1.2)。使用长下端塞和外抓上端塞。使用长下端塞燃料棒是为了安装、固定保护格架,且可改善冷却剂引起的燃料棒与底部格架间的微振磨损。由于燃料组件全长和燃料芯块长度是一定的,所以,长下端塞燃料棒与下管座之间的间距被缩小。外抓上端塞是为了方便堆中运行时对组件燃料棒的修复和更换。在燃料棒包壳外表面下端实施硬包覆能提高包壳对碎片和格架的抗磨损性能。生成包覆层的方法是:在高温空气或氩气气氛下,使用炉子、感应或电阻加热进行处理,也可进行激光表面处理。抗碎片氧化层设计上确定的厚度为 3~5 μm ,氧化长度为 150 mm(从棒下端算起)。使用变节距弹簧代替等节距螺旋弹簧压紧芯块,增大裂变气体贮存空腔。棒径由 9.5 mm 减少到 9.1 mm,燃料棒两端各有长 150 mm 环状低浓铀(2.6%)屏蔽芯块。中间段芯块的²³⁵U 富集度为 4.45%。常规芯块柱的乏燃料中两端残存的²³⁵U 较中间高。而由反射段和较高富集度芯块构成的芯块柱则把残存²³⁵U 含量沿芯块柱轴向展平,使²³⁵U 获得了更有效的利用(图 3)。反射段芯块设计减少了堆芯轴向中子泄漏约 50%,提高铀利用率约 2%,节省燃料循环费用约 1.5%~1.2%。反射段芯块可设计成实心 and 空心两种。用空心芯块代替原来使用的实心芯块,还为释放的裂变气体提供了额外贮存空间。采用超声检验燃料棒环焊缝和堵孔焊。西屋采

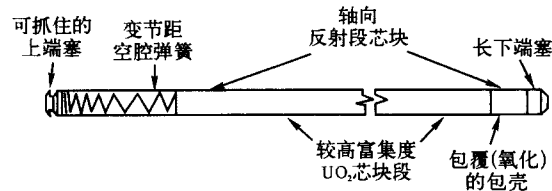


图 2 先进燃料棒设计

Fig. 2 Design of advanced fuel rod

用超声的方法进行100%检验。

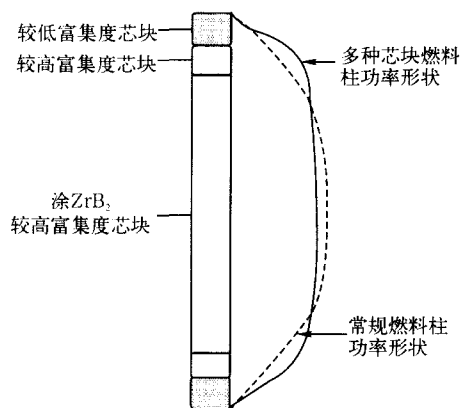


图3 带反射段芯块的燃料棒

Fig.3 Fuel rods with axial blanket pellets

2.2 格架

格架共有12个,分为4种类型。

1) 6个中部格架,采用低压降(LPD)设计,材料为ZIRLO合金。中部格架用全锆(ZIRLO)合金制造。与3G不同,弹簧呈45°倾斜,与条带一体加工,既使弹簧强度增加,又增加了与燃料棒的接触,减轻了应力集中;条带上流边倒角,降低了流阻,改善了格架的热工水力性能;中部格架栅元中弹簧和刚凸在轴向和径向支持着燃料棒,允许燃料棒辐照生长和热膨胀,并可适当移动。

2) 2个端部格架仍采用无搅混翼的Inconel 718格架。功能是在燃料寿期末仍保持一适当的燃料棒夹持力,以限制燃料棒的轴向移动。

3) 3个中间混流格架(IFM)位于高功率区,材料采用ZIRLO合金。形式与中部格架完全相同,高度约为中部格架的一半。增加了IFM,热工性能提高了20%,适用于先进的低泄漏燃料管理,对提高堆芯中子经济性和降低压力容器 neutron 剂量有利。

4) 1个保护格架(图4)为无搅混翼的Inconel 718格架。它紧靠下管座,作为对外来物的防护措施之一。保护格架处在底部格架和下管座之间,紧靠下管座及底部格架。保护格架的功能可以归纳为:对燃料组件流水压力降影响减少到最低程度;阻挡住通过过滤小孔下管座的碎片,被捕获到的碎片尺寸将是通过小

孔过滤下管座碎片的1/2和1/4;由于保护格架夹住了燃料棒实心下端塞,因流体通过下管座后重新分布而诱发的燃料棒振动下移,从而减轻了燃料棒在底部格架中的晃动。所以,即使很小的碎片被底部格架捕获,也不会出现碎片磨损燃料棒的包壳。

2.3 管座

可拆结构:上下管座均可拆,材料为低钴304不锈钢,上管座为快可拆式,上下管座匹配板厚度各降5mm,以适应燃料的辐照生长。

小孔过滤下管座(图4)设计:下管座流水孔为小孔设计。为了不增大总流阻,小孔过滤下管座孔板上总流水孔数量大大增加。

2.4 高效防金属异物的结构设计

对外来异物的三重防护措施,使燃料可靠性大大提高:1)防止外来物的下管座(DFBN),流水孔改为小圆孔;2)紧靠下管座的保护格架,条带组装的十字对准下管座的流水孔位置;3)燃料棒下端塞为实心锥形结构(长20.6mm),伸到保护架内,距匹配板2.2mm,且燃料棒下端部覆盖了抗磨氧化膜。

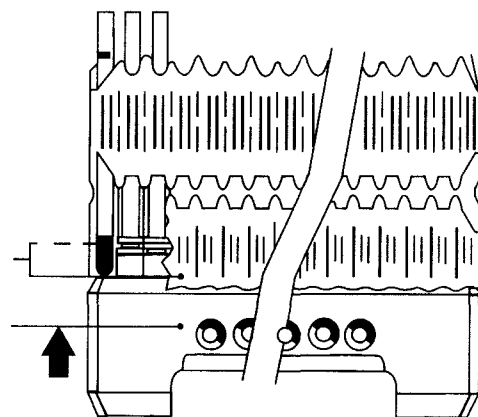


图4 保护格架-过滤下管座-Performance+防屑装置特征

Fig.4 Protective grid-debris filter bottom nozzle-performance+debris resistance features

2.5 一体化的燃料可燃毒物吸收体(IFBA)

在芯块外表面涂覆一层厚度约为25 μm的ZrB₂(图5)。与其它含钐可燃毒物相比,IFBA的优点是:所有燃料的富集度都相同;反应性惩罚为零,不存在残余抑制效应不利之处,

在堆内可完成烧尽,反应堆中子利用率高,使燃料循环费用相对硼硅玻璃/不锈钢节省约3%; ^{10}B 材料的性能清楚,毒性能完全控制。缺点是:耗损速率不能改变,给堆芯设计带来了困难,若燃烧太快,就得更换燃料,同时造成功率分布不均匀,可能需用其它类型可燃毒物棒来调剂,这对燃料管理带来了困难;等温系数(ITC)较 Gd_2O_3 高;硼临界浓度可随辐照的加深而增加;某些安全系数可能要求重新分析; ^{10}B 贫化,释放氦气,燃料棒内压增加,燃料棒性能将受到影响。

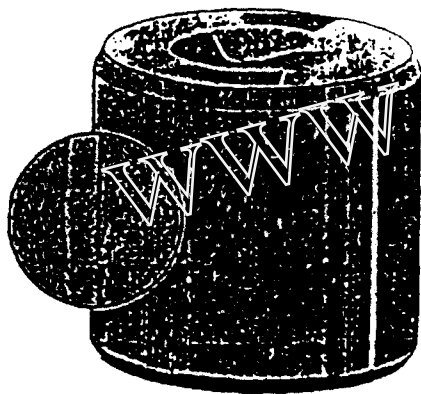


图5 涂 ZrB_2 的燃料芯块

Fig. 5 Depositing a thin zirconium diboride pellet

制造 IFBA 棒的主要设备有磁控等离子溅射设备:1) 采用 10 000 V 高压将 Ar 离子化,然后使 ZrB_2 靶件汽化,并使之涂于 UO_2 芯块上,这台设备庞大且复杂,辅助设备多,并需浓缩(50%)的 ^{10}B 同位素;2) 装管和焊接设备,整个系统在干燥气氛下运行,要求非常苛刻。

通常,燃料组件中 IFBA 燃料棒在 80~156 根范围内,约占燃料棒总数的 1/3~1/2。

3 其它高性能燃料组件

3.1 HTP 燃料组件

HTP 燃料组件是原西门子动力公司 20 世纪 80 年代末期开发的产品。结构与 P+、3G 燃料组件有明显不同,表现在以下 4 个方面。1) 共有 11 个格架,其中,半跨距格架 3 个。格架外形上只有外条带上仍保留了导向翼,无内条带的搅混翼,是通过栅元和燃料棒间所形成间隙,组装的内条带间形成扁形倾斜的

通道及其通道上的细长槽搅混了燃料棒周围的冷却剂,每个燃料棒栅元中,扁形通道与燃料棒形成了 8 条线接触,这种结构是全 Zr 合金的格架,导向管与格架的连接直接点焊,不需点焊舌。2) 采用 Zr-4 复合包壳(称为 ELS-DUPLEX),即在 Zr-4 合金基体上复合了一层更为耐水侧腐蚀的超低锡(ELS)锆合金构成了双层(DUPLEX)包壳。3) 上管座采用精密铸造。上管座部件的连接是纯机械的,连接件加工较为简单,拆装也简单,为快速可拆上管座。4) 下管座采用曲片过滤碎片。

3.2 ALLIANCE 燃料组件

法玛通开发的 ALLIANCE 燃料组件于 1999 年先导组件入堆考验。其高性能目标如下:1) 设计燃耗至少达到 75 $\text{GW} \cdot \text{d}/\text{t}$;2) 高的热工水力性能,临界热流密度值比 3G 提高 10%,允许采用更为经济的燃料管理策略,可在更高功率峰因子下运行,或允许电厂进一步提高功率所要求保证的运行裕度;3) 全锆的结构搅混格架,跨间搅混格架为选项,定位格架具有圆滑四角,高度加高,外条带被加强,搅混翼在上而焊舌在下,便于制造、吊装和维修;4) 新的组件结构概念,把燃料棒坐在下管座上,使导向管始终处于拉伸状态,利于减少组件弯曲;5) 全部锆合金件均使用 M5 合金,防止过分的辐照生长并提高在高燃耗下的抗辐照性能;6) 可快速拆下组件的上管座;7) 组件具有高的辐照几何稳定性,并考虑了辐照性能的未来安全要求,且容易吊装,能降低回路辐照剂量,减少回路冷却剂的剂量,符合“无拆下零件概念”和“零破损”概念。

3.3 ROBUST 燃料组件

西屋公司在 P+ 燃料组件成功运行的基础上,正在开发 ROBUST 燃料组件,它有加大的冷却剂搅混翼,具有更高的热工水力性能,提高组件可靠性和安全性。

4 AFA 3G 燃料组件的国产化

1998 年 10 月,首批 3G 换料组件装入法国核电站反应堆,但组件没有中间混流格架。1999 年,瑞典 900 MW 灵哈尔斯(Ringhals)堆也使用 3G 换料,组件带有中间混流格架。到 2001 年年底,世界上约 50% 的采用 17×17 燃

料组件的压水堆也使用了 3G 燃料组件。

1999 年底,大亚湾核电站的 2 号机组反应堆首次装入了 4 个 3G 先导燃料组件,它在堆内已完成了两个循环,大亚湾核电站在换料期间检查了先导组件的所有性能,所有的检查和试验结果良好,没有发现任何不良现象。与此同时,观察经历了 3 个循环的 2G 燃料组件,没有发现振动磨蚀的迹象。

YFP 自 1999 年开始引进法玛通公司的 3G 制造技术,在 2000 年 10 月全部完成工艺合格性鉴定,2001 年 3 月完成全部产品合格性鉴定,8 月 20 日完成了两个堆芯 108 组燃料组件的生产。目前,已装入大亚湾核电站的两个堆芯。初步运行数据,特别是启动物理试验数据表明:AFA 3G 燃料组件的设计和制造是成功的、先进的;控制棒价值、临界硼浓度、等温温度系数等设计预计值与实测值符合良好;此外,未出现堆芯功率象限倾斜超限问题。

5 高性能燃料组件的发展动向和对我国高性能燃料组件发展的建议

当前,国际燃料设计制造商为争夺压水堆高性能燃料设计的主导权和领先权,进而争夺燃料市场激烈竞争,不断改进和设计新的燃料组件^[4],主要集中在以下 4 个方面。

1) 改进燃料芯块性能。为解决燃料芯块裂变气体释放(FGR)和芯块与包壳的相互作用(PCI),世界各大公司均在开发大晶粒的 UO_2 燃料芯块。此外,优化燃料芯块的高径比,以有效减轻燃料棒在辐照下的变形。

2) 改进结构材料,提高抗腐蚀性能,减少蠕变,改善微观结构,减少燃料棒辐照生长。

3) 组件结构,包括格架、导向管、管座和燃料棒的改进。使其具有抗异物磨蚀性能、改善热工水力性能、提高组件抗弯曲性能、提高组件

堆芯运行的峰值因子 F_Q 、 $F_{\Delta H}$,结构件具有快速可拆结构。

4) 优化燃料管理方案,降低堆芯运行的燃料成本,燃料管理策略具有灵活性,实施低泄漏装方式,以增加反应堆寿命。

2002 年初,18 个月换料循环在大亚湾核电站开始实施,这是我国核电发展史上新的里程碑。YFP 已成功为大亚湾核电站制造了 664 个 2G 燃料组件,入堆的燃料组件运行状况良好。在此基础上,进一步引进 3G 燃料组件制造技术后,国产 AFA 3G 燃料组件在反应堆中运行良好,这为掌握当前世界先进水平的高性能燃料组件的制造技术奠定了基础。

我国高性能燃料组件发展的技术路线应该在消化 3G 的基础上,以对 3G 的进一步改进为目标,组织联合攻关,做好研发工作,积极争取参加国际合作。同时,应注意解决改进生产规模小、工艺装备水平低、生产成本高的问题,积极推进原材料国产化比重,并注重形成自主知识产权。在我国进入 WTO 的形势下,把我国的燃料制造业做大做强,以迎接堆芯设计和运行方式改进所带来的挑战,迎接核燃料激烈竞争的挑战,迎接电站用户对未来燃料的需求。

参考文献:

- [1] 和卫东. 关于压水堆高性能燃料发展的思考[J]. 核动力工程,1998,19(4):365~369.
- [2] 段德智. 高性能核燃料组件发展动向[J]. 核电工程与技术,2001,14(3):23~30.
- [3] 扎依莫夫斯基 AC. 核动力用钎合金[M]. 北京:原子能出版社,1988. 223~224.
- [4] 朱关仁. 日本高燃耗大晶粒 UO_2 芯块的制造技术及其性能[J]. 核电工程与技术,1999,12(2):12~18.
- [5] Gross HP. Fuel Design(PWR)[J]. Nuclear Engineering International, 1994,39(482):22~28.