

跨间交混格架对 EPR 堆芯 DNBR 裕量的影响

陈 军, 周有新, 李石磊, 毛玉龙, 文青龙

(中核华核电技术研究院有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要:采用 FLICA III-F 子通道程序, 分析了 AFA 3GLE 燃料组件加装跨间交混格架(MSMG)后对台山 EPR 堆芯热工参数和最小 DNBR 的影响。分析结果表明, 在名义工况下加装 MSMG 后, 轴向功率呈余弦分布和轴向功率偏差 $AO = +9\%$ 将分别提高 EPR 堆芯的 DNBR 裕量约为 24% 和 28%, 同时增加 EPR 堆芯压降约 10.1%。

关键词:跨间交混格架; AFA 3GLE; 热工水力; 临界热流密度关系式

中图分类号: TL33; TL364.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)02-0249-05

doi: 10.7538/yzk.2013.47.02.0249

Effect of Mid Span Mixing Grid on EPR Core DNBR Margin

CHEN Jun, ZHOU You-xin, LI Shi-lei, MAO Yu-long, WEN Qing-long

(China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518026, China)

Abstract: The effect of mid span mixing grid (MSMG) on the EPR core thermal-hydraulic parameters and minimum DNBR was analyzed by employing FLICA III-F sub-channel code. The results show that DNBR margin of EPR core can be improved respectively about 24% and 28% for normal condition with cosine and $AO = +9\%$ power distributions by adding 4 MSMGs on AFA 3GLE fuel assembly, while the pressure drop in EPR core increases about 10.1%.

Key words: mid span mixing grid; AFA 3GLE; thermal-hydraulic; CHF correlation

临界热流密度(CHF)综合反映了燃料组件内冷却剂的流动与传热特性,直接影响到堆芯临界热流密度与当地热流密度之比(DNBR)是否具有足够的安全裕量。为了提高堆芯的 DNBR 安全裕量,许多压水堆的燃料组件均采用加装跨间交混格架(MSMG/IFM)的方式,改善燃料组件的流动交混特性,以适当增加燃料组件的流动压降为代价提高其 CHF,例如,中

国 CPR1000 采用的 AFA 3G 燃料组件、美国 AP1000 采用的 Robust XL 燃料组件等。

本文针对台山 EPR 机组采用的 AFA 3GLE 燃料组件的堆芯,分析在核蒸汽供应系统(NSSS)运行参数和不同轴向功率分布(参考截断余弦分布、 $AO = +9\%$)下, AFA 3GLE 燃料组件加装 MSMG 对其堆芯 DNBR 裕量的影响。

1 燃料组件结构

在压水堆燃料组件结构中,交混格架的条带上部设有交混翼,可起到促进燃料棒流道间冷却剂交混的作用。为了进一步改善燃料组件热工水力性能,在易发生最小 DNBR 的燃料组件上部区域加装了跨间交混格架(MSMG/IFM),以加强该区域燃料棒流道间冷却剂的交混。表 1^[1]列出现有 PWR 燃料组件加装

MSMG 或 IFM 的情况。

台山核电厂采用了欧洲先进压水堆 EPR,堆芯装载 4 200 mm(约 14 英尺)17×17 AFA 3GLE 燃料组件^[2],如图 1 所示,在活性段内布置了 8 个交混格架。本文对 AFA 3GLE 燃料组件上半部加装 4 个 MSMG,分析其对 EPR 堆芯流场以及 CHF 等热工水力性能参数的影响规律。

表 1 现有 PWR 燃料组件加装跨间交混格架情况^[1]

Table 1 Characteristics of fuel assembly in PWR^[1]

燃料制造商	燃料名称	活性段长度/英尺	排列方式	是否加装 MSMG/IFM	加装数量
伊奴卅(ENUSA)	MAEF+IFM+PG	12	17×17	是	3
欧洲燃料联合体 (European Fuel Group)	MAEF	14	17×17	否	
	MAEF-IFM	12	17×17	是	3
	Performance+	12	15×15	是	3
阿海珐(AREVA NP)	ALLIANCE	12、14	17×17	否	
	AFA 2G	12	17×17	否	
	AFA 3G	12	17×17	是	3
	AFA 3GLE	14	17×17	否	
法国核燃料公司(KNFC)	ACE7	12	17×17	是	3
西屋公司(Westinghouse)	Robust	12	17×17	是	3
	Robust XL	14	17×17	是	4

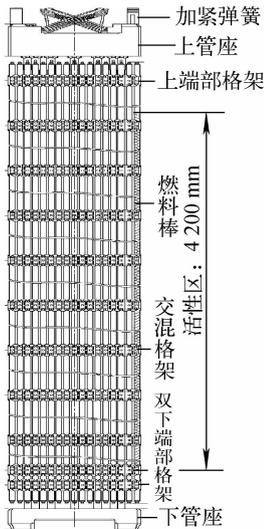


图 1 EPR 采用的 AFA 3GLE 燃料组件^[3]

Fig. 1 Structure of AFA 3GLE in EPR^[3]

2 计算方法

2.1 计算假设

假设:1) EPR 堆芯最大径向焓升因子发生在堆芯中心位置的燃料组件内,使其成为堆芯最热组件;2) 采用入口流量分配因子对堆芯入口流量

进行惩罚,堆芯中心位置燃料组件为 0.95,堆芯外围燃料组件为 1.02,其余燃料组件为 1.0。

以上假设实现了 FLICA III-F 子通道程序对堆芯最小 DNBR 的包络计算。

计算工况的其他参数列于表 2。在计算中,对于轴向功率分布主要考虑两种情况:一种是典型峰值的截断余弦功率分布;另一种是 AO=+9% 的功率分布。其中,MSMG 采用 CPR1000 的 AFA 3G 燃料组件中的 MSMG,其湍流热扩散系数和压降系数取相同值。

表 2 EPR 热工参数^[4]

Table 2 Thermal-hydraulic parameters of EPR^[4]

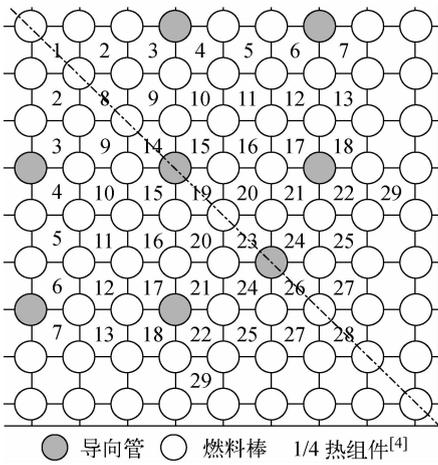
参数	数值
堆芯功率	4 590 MW
堆芯出口压力	15.5 MPa
堆芯入口温度	294.6 °C
压力容器进口流量 ¹⁾	26 980×4 m ³ /h
堆芯旁流份额	5.5%
湍流黏性系数	0.00
湍流热扩散系数	0.043
径向核焓升因子	1.58
轴向功率峰值因子	1.45
MSMG 压降系数	0.690

注:1) 热工设计流量

2.2 子通道划分

EPR 堆芯由 241 个燃料组件组成,FLICA III-F 程序将 EPR 的 1/4 堆芯划分为 68 个子通

道^[5],建立了子通道分析模型(图 2)。燃料组件沿轴向划分为 32 个节点,加装 4 个 MSMG 后轴向节点增加至 36 个(图 3)。



	30	31	34	35	36	37	38	39	40
30	32		41	42	43	44	45	46	47
31		33							
34	41		48	49	50	51	52	53	54
35	42	49		55	56	57	58	59	60
36	43	50	56		61	62	63	64	
37	44	51	57	62		65	66	67	
38	45	52	58	63	66		68		
39	46	53	59	64	67				
40	47	54	60						

1/4 堆芯^[5]

图 2 1/4 堆芯内的子通道划分^[4-5]

Fig. 2 Sub-channel in 1/4 core^[4-5]

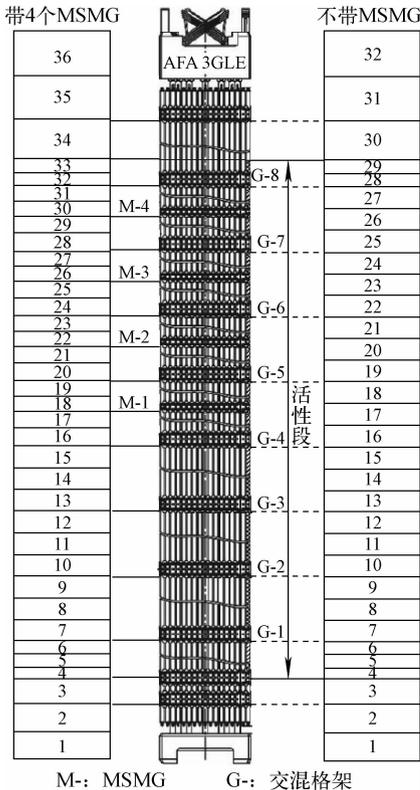


图 3 燃料组件轴向网格划分^[5]

Fig. 3 Axial meshing of fuel assembly^[5]

2.3 临界热流密度(CHF)关系式

本文采用 FC2S 关系式评价 EPR 堆芯加装

MSMG 后 AFA 3GLE 燃料组件的 CHF 特性。

FC2S 关系式是 FC2002 关系式和 RFBC 关系式的组合,FC2002 关系式是在 FC2000 关系式的 1572 试验数据基础上发展而来的,FC2000 关系式适用于带或不带 MSMG 的 AFA 3G 燃料组件^[6]。RFBC 关系式仅用于预测燃料组件活性段第 1 道交混格架前区域的 CHF。

3 计算结果与讨论

本文将围绕最热子通道和最小 DNBR 发生处的截面位置,分析 MSMG 对堆芯热工参数和 DNBR 的影响。

3.1 MSMG 对堆芯流量和温度分布的影响

最热子通道相对质量流密度的轴向分布如图 4 所示,0 MSMG 表示不带 MSMG,4 MSMG 表示带 4 个 MSMG(下同)。MSMG 加强了 1/4 中央组件中 1~28 号子通道间的水力交混,提高了该燃料组件内各子通道的轴向质量流速,随着子通道内流体温度的升高,MSMG 对轴向质量流速的增加减弱。图 4 中,相对质量流密度为热组件内各子通道质量流密度与堆芯平均质量流密度之比,轴向相对高度为燃料轴向位置高度与堆腔高度之比。

由于中央燃料组件各子通道间的冷却剂温度

表 3 最小 DNBR 及其发生位置
Table 3 Minimal DNBR and its location

类型	截断余弦分布			AO=+9%		
	最小 DNBR	DNBR 裕量/%	发生位置/cm	最小 DNBR	DNBR 裕量/%	发生位置/cm
未加 MSMG	2.483	105	268.95	2.026	67.4	409.95
添加 4 个 MSMG	2.766	129	218.15	2.365	95.5	409.95

注:台山 EPR 堆芯的 DNBR 设计限值为 1.21^[4]

3.3 MSMG 对堆芯压降的影响

MSMG 的功能只是交混冷却剂,以提高热工-水力性能。由于 MSMG 中不含弹簧和较少的承载要求,其外形尺寸较交混格架小,可减少中子吸收和压降系数,同时,在吊装和极限事故工况下,可使 MSMG 所受的载荷最小。每个 MSMG 栅元有 4 个半球形刚凸,以防止燃料棒与交混翼接触,且考虑到燃料组件制造过程中燃料棒拉棒,在燃料棒与刚凸间留有一小的间隙。

计算表明:在台山 EPR 堆芯热工参数下,增加 4 个 MSMG 将增加堆芯压降约 10.1%,约为 23.98 kPa,如图 7 所示。这意味着将增加 AFA 3GLE 燃料组件的水力载荷,对主泵的运行点、燃料组件的压紧系统均提出了新的要求。

4 结论

对台山 EPR 堆芯 AFA 3GLE 燃料组件的上半部加装 4 个 MSMG,分析了 MSMG 对台山 EPR 堆芯 DNBR 裕量的影响,结论如下。

1) 加装 MSMG 加强了 EPR 堆芯中央组件各子通道间的横向交混和最热子通道的质量流密度,提高了 CHF,其中,横向交混效应起主导作用。

2) 在截断余弦功率分布下,MSMG 改变了堆芯最小 DNBR 的发生位置,并提高 EPR 堆芯的 DNBR 裕量为 24%;在 AO=+9%轴向功率分布下,MSMG 未改变堆芯最小 DNBR 的发生位置,但提高 EPR 堆芯的 DNBR 裕量为 28%。

3) 加装 4 个 MSMG 将增加台山 EPR 堆芯压降约 10.1%。

参考文献:

- [1] Nuclear Engineering International. Annual fuel review; Design data[R]. United Kingdom: Harcourt Brace Company Ltd., 2004.
- [2] UK-EPR™ GDA Submission. EPR design description[R]. Paris: AREVA and EDF UK, 2005.
- [3] AREVA-NP Fuel Sector. AFA 3GLE EPR™ fuel assembly data sheet for Taishan 1&2 reactors [R]. Paris: AREVA Company Ltd., 2009.
- [4] LESNE V, MAO Yulong. EPR™ TSN; Thermal-hydraulic design report (Rev. A) [R]. Paris: Taishan Nuclear Power Station, 2009.
- [5] MAO Yulong, LESNE V. EPR™ TSN-FLICA III-F reference input deck (Rev. A) [R]. Paris: Taishan Nuclear Power Station, 2009.
- [6] 柴国早,王小海,陈召林,等. 对临界热流密度计算关系式 FC-2000 的审评[J]. 核动力工程, 2003,24(6):84-87.
CHAI Guohan, WANG Xiaohai, CHEN Zhao-lin, et al. Review of correlation FC-2000 for critical heat flux calculation [J]. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(6): 84-87(in Chinese).

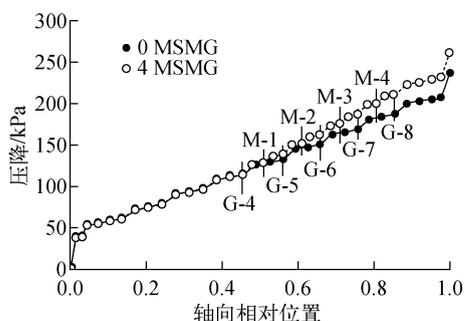


图 7 最热子通道轴向压降

Fig. 7 Pressure drop in the hottest sub-channel

但还需指出,EPR 为满足 EUR 用户要求,具备 15%的堆芯安全裕量,且采用了全新设计的反应堆控制、监测和限制系统(RCSL),将在线简化计算的 DNBR 直接作为反应堆的停堆保护信号^[2],显然,进一步通过对 AFA 3GLE 燃料组件加装 MSMG 增大堆芯安全裕量,并不经济。但作为一种长寿命设计(60 a 寿命)的核电站,保留一种增加堆芯安全裕量的措施,以满足技术进步改造对堆芯安全裕量的需要,也是非常有用的。