

文章编号：0258-0926(2014)04-0048-04；doi：10.13832/j.jnpe.2014.04.0048

核反应堆堆内金属反射层旁流分析方法研究

石琳，方健，冉小兵，戴长年

深圳中广核工程设计有限公司，广东，深圳，518124

摘要：金属反射层铁水比高，需要确定其旁流份额，从而优化其结构设计、并为金属反射层温度场计算提供输入。采用计算流体动力学分析（CFD）数值模拟，计算堆内构件金属反射层的旁流份额，并对计算结果进行分析评价，与基于经验公式的分析方法及实验结果进行了对比。通过分析比较得出：CFD 数值计算可模拟复杂流道结构，反映流场特征，计算结果有效。

关键词：金属反射层；CFD 数值模拟；旁流分析；核反应堆

中图分类号：TL351⁺.2 文献标志码：A

0 引言

金属反射层位于反应堆压力容器内部，从堆芯下板一直延伸到燃料组件上管座以上，形成堆芯的周向封闭边界，为堆芯提供约束。

1 结构简介

金属反射层主要由 12 块锻件组成，其内轮廓与堆芯轮廓一致，外轮廓为圆柱形（图 1）。其中上部 11 块锻件结构基本相同，布置有竖直旁流水孔。底板为多孔腔室结构，布置有侧向旁流水孔、引流槽和分配腔室（图 2）。

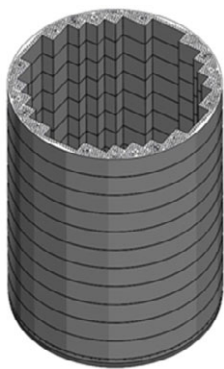


图 1 金属反射层
Fig. 1 Metal Reflector

金属反射层相比于目前广泛采用的围板-辐板结构，辐射屏蔽能力好，中子反射能力好，结构整体性强。但是铁水比高，在辐照下金属反射

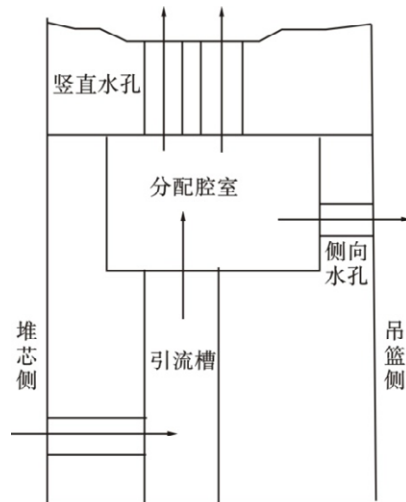


图 2 反射层底板
Fig. 2 Bottom Plate of Reflector

层会产生较多的热量，金属温度过高，有发生蠕变失效的可能。因此在反射层上布置流水孔来冷却金属壁，并将热量带出，所以需要确认反射层的旁流份额足够。反应堆热工水力设计时，堆芯冷却剂效率的确定也和反射层旁流密切相关。综上所述，需要进行反射层旁流分析，为反射层温度场计算提供输入，也为反应堆热工水力设计提供参考。文中首先采用计算流体动力学分析（CFD）^[1]数值模拟进行旁流分析，然后与基于经验公式的分析、实验结果对比评价，完成了反射层旁流分析。

2 旁流分析

2.1 分析方法

采用 CFD 数值模拟计算旁流,研究不同流速下,阻力特性参数随雷诺数的变化,从而确定反射层旁流。方法如下:

(1) 根据如下流体力学公式^[2],计算不同流速(流量)下压差,得到阻力特性参数 K ,进而得到阻力特性参数随雷诺数变化曲线。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho K V^2 \quad (1)$$

式中, ΔP 为压差; ρ 为流体密度; K 为阻力系数; V 为流速。

且:

$$Q = SV \quad (2)$$

式中, Q 为流量; S 为流通面积。

(2) 然后根据式(1)中得到的阻力特性参数 K ,基于反射层压降,算出进入反射层的旁流量。

(3) 最后,基于式(2)中的流量,算出进入反射层的旁流份额。

2.2 计算模型

金属反射层结构的计算模型简化如下:

(1) 考虑到燃料组件和金属反射层结构的对称性,选取 1/8 模型进行计算。

(2) 为简化计算模型,考虑到与竖直水孔相比,分配腔室外侧侧向水孔的影响较小,故不考虑其影响。

(3) 模拟外围燃料组件、反射层侧向入水孔、引流槽、分配腔室、竖直水孔的流体域。

为了减少网格数量,只模拟燃料组件高度(包括下管座)截面积。反射层竖直水孔采取设置多孔介质的方式来减少网格数量。

(4) 采用网格生成软件 ICEM CFD 建立三维网格模型,全局最大网格尺寸采用 16 mm,局部网格加密,最小尺寸为 0.6 mm。本网格模型计算表明,加边界层之后,对结果影响甚微,为了减小网格数量及计算时间,未加边界层,如图 3 所示。

2.3 计算结果

物理模型采用 k -Epsilon 模型^[3],速度入口/自由出流边界条件,一阶迎风模式,时间步长采用物理时间步长为 0.0001 s。得出阻力系数随雷诺数变化曲线,如图 4 所示。

阻力系数值为 1.164,计算得到旁流份额为 2.33%。

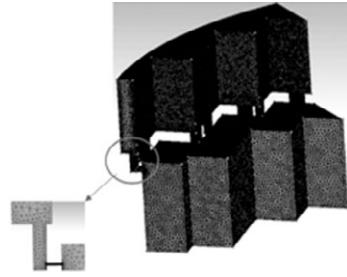


图 3 网格模型

Fig. 3 Mesh Model

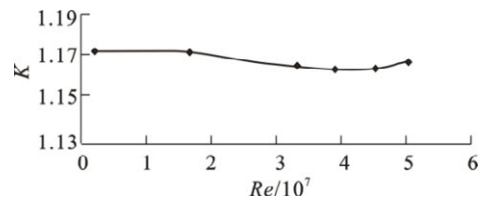


图 4 阻力系数随雷诺数变化曲线

Fig. 4 Curve of Resistance Coefficients Change with Reynolds

3 结果分析评价

3.1 数值模拟分析评价

基于前文 CFD 数值模拟计算,进行分析评价。

(1) 竖直孔压降对反射层整体压降的影响。考虑到网格数量及计算速度的问题,本次 CFD 计算只考虑底板压降及阻力特性,得出阻力特性值比实际小,旁流比实际大,计算是保守的。

通过计算可知,竖直孔压降只占反射层压降的 3.48%,影响甚微。

(2) 设置多孔介质的影响。通过计算表明,在分配腔室上部竖直水孔区域是否设置多孔介质,只影响流动情况,对压降及阻力特性影响甚微。通过流线图可以得出,设置多孔介质之后,流动在分配腔室搅混更均匀。

3.2 与基于经验公式的分析对比

针对金属反射层结构,主要压降损失包括:侧向入口水孔压降损失、引流槽压降损失、分配腔室压降损失、竖直水孔压降损失。

基于公式(1)和(2),应用 Idelchik 关系式^[4],有:

(1) 沿程压降损失阻力系数:

$$K_1 = \lambda \times \frac{L}{D_h} \quad (3)$$

式中, λ 为摩擦阻力系数; L 为流过的长度; D_h 为当量直径。

(2) 渐缩压降损失阻力系数:

$$K_2 = \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{S_{\text{downstream}}}{S_{\text{upstream}}} \right)^{0.75} \quad (4)$$

式中 $S_{\text{downstream}}$ 为下游流通面积； S_{upstream} 为上游流通面积。

(3) 渐扩压降损失阻力系数：

$$K_3 = \left(1 - \frac{S_{\text{upstream}}}{S_{\text{downstream}}} \right)^2 \quad (5)$$

计算得到旁流份额为 2.29%。CFD 数值模拟与基于经验公式的分析结果相差 1.7%，在可接受范围内。

3.3 实验验证

实验本体中的反射层旁流结构是将原型中反射层组件周向局部截取 1/8，由于第二层以后结构完全相同，只取前三段进行研究。反射层旁流实验本体如图 5 所示。

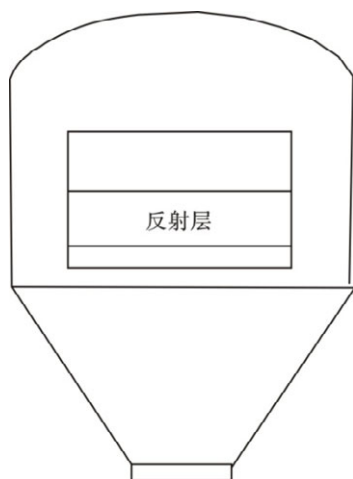


图 5 反射层旁流实验本体图

Fig. 5 By-Pass Flow Experimental Device for Reflector

从实验得知，阻力系数为 1.2，计算得到旁流份额为 2.3%。CFD 数值模拟与实验结果相差 1.3%，在可接受范围内。

3.4 分析比较

由前文计算可知，基于经验公式的分析采用

经验公式计算，方法成熟，但是无法模拟复杂流道结构，计算存在不确定性。

实验可为计算结果提供参考及验证，但是入口压降测点存在反射层底板圆周方向的不均匀性。

CFD 数值模拟，相对于基于经验公式的分析可以更真实模拟底板复杂结构；相对于实验验证更接近实际运行条件，能够合理的反映流场特征。与基于经验公式的分析、实验验证对比分析计算表明，结果不确定度在可接受范围内。同时，由于几何结构简化、网格模型、物理模型、边界条件、数值误差等因素影响，分析结果也会存在一定误差。

4 结论

本文采用 CFD 数值计算方法对反应堆堆内构件金属反射层进行旁流分析，并对分析方法进行评价，又与基于经验公式的分析、实验验证进行了对比。得出如下结论：

(1) 相比于基于经验公式的分析和实验验证，CFD 数值模拟更真实地模拟了复杂流道结构及流场特征。针对结构进行模型简化，并对数值模拟结果进行评价，论证了模型简化的有效性。

(2) 数值模拟与基于经验公式的分析、实验结果进行比较，计算结果不确定度在可接受范围内，验证了数值模拟结果的有效性。

参考文献：

- [1] 曾小康, 李永亮, 闫晓, 等. CFD 方法在超临界水冷堆热工水力研究中的应用现状[J]. 核动力工程, 2013, 34(1): 114-120.
- [2] 孔珑. 工程流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 徐江荣, 裘哲勇. 热流过程的数学模型和数值模拟[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [4] Idelchik I E. HANDBOOK OF HYDRAULIC RESISTANCE [M]. Greta R. Malyavskaya. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1986.

Analysis on Method of Reactor Metal Reflector By-pass Flow

Shi Lin, Fang Jian, Ran Xiaobing, Dai Changnian

China Nuclear Power Design Company, Ltd, Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: The metal is much more than the water for the heavy reflector. By-pass flow should be calculated, which can optimize structure and provide input for the thermal analysis. CFD can be used for analysis the portion of metal reflector by-pass flow, and then results can be analyzed and evaluated. Finally, use the results to compare with the theoretical analysis and experimental results. The result show that the complex channel and the characteristics of the flow field can be simulated by CFD, results are credible.

Key words: Metal reflector, CFD, By-pass flow, Reactor

作者简介：

石琳（1986—），女，助理工程师，硕士研究生。2011年毕业于清华大学核能与核技术专业。现从事反应堆结构设计工作。

方健（1981—），男，工程师，硕士研究生。2006年毕业于华中科技大学机械设计及理论专业。现从事反应堆结构设计工作。

冉小兵（1969—），男，高级工程师。1993年毕业于哈尔滨船舶工程学院机械设计及制造专业。现从事反应堆结构设计工作。

（责任编辑：刘胜吾）