

新型先进压水堆反射层旁流设计改进

胡艺嵩, 蒙舒祺, 李可嘉, 毛玉龙, 胡友森

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2022年4月21日; 录用日期: 2022年5月7日; 发布日期: 2022年7月1日

摘要

反应堆水力学设计的主要内容包括确定反应堆压力容器和堆芯的压降与旁流。传统CPR1000核电站采用的围板-辐板-吊篮筒体结构, 容易出现销钉掉落等问题, 影响了核电站的正常运行。因此, 先进压水堆设计中考虑采用金属反射层结构代替上述结构。本文采用自主开发的旁流计算程序ELM, 对反应堆压力容器压降和旁流进行了详细计算, 并与实验结果进行了对比分析, 计算结果证明了金属反射层的结构改进是合理可靠的。

关键词

水力学, 金属反射层, 旁流

Improvement of Reflector Bypass Design for New Advanced Pressurized Water Reactor

Yisong Hu, Shuqi Meng, Kejia Li, Yulong Mao, Yousen Hu

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Apr. 21st, 2022; accepted: May 7th, 2022; published: Jul. 1st, 2022

Abstract

The main contents of reactor hydraulic design include determining the Reactor Pressure Vessel, pressure drop and side flow of the core. The traditional CPR1000 nuclear power plant adopts the structure of baffle-former-barrel, which is prone to the problem of pin falling, which affects the normal operation of the nuclear power plant. Therefore, the metal reflector structure is considered to replace the above structure in the design of advanced pressurized water reactor. The Reactor Pressure Vessel pressure drop and bypass flow are calculated in detail by using the self-developed bypass flow calculation program ELM, and compared with the experimental results. The calculation results prove that the structural improvement of metal reflector is reasonable and

reliable.

Keywords

Hydraulics, Metal Reflector, Bypass Flow

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

反应堆水力学设计的主要内容是确定反应堆压力容器和堆芯的压降,计算堆内各部分的旁流份额[1]。在高温气冷堆中,旁流的存在从一定程度上改变了堆芯的流量分布,继而影响堆芯的温度分布及燃料的最高温度[2]。在传统的 CPR1000 压水堆中,旁流或漏流[3]一般分为 5 股:上封头旁流,出口管缝隙漏流,导向管旁流[4],围板与吊篮之间环形空腔旁流[5],围板横向开孔漏流[6]。其中围板与吊篮之间采用围板-辐板-吊篮筒体结构[7],在电厂正常运行的过程中,容易出现销钉掉落等问题。因此,新型先进压水堆核电设计中采用金属反射层[8]代替围板-辐板-吊篮的筒体结构。金属反射层由 12 块锻件构成,其内轮廓与堆芯轮廓一致,外轮廓为圆柱形。其中上部 11 块锻件结构基本相同,内有竖直旁流水孔,底板为多孔腔室结构,布置有侧向流水孔、引流槽和分配腔室[9]。其主要优点是减少中子泄漏,提高经济性;减弱对 RPV 的辐照损伤,延长反应堆使用寿命;简化堆内结构,避免出现螺栓和焊缝。

本文通过建立合理的数学模型,自主开发的旁流计算程序 ELM,对反应堆压力容器压降和旁流进行了详细计算,并与实验结果进行了对比分析,计算结果证明了金属反射层的结构改进是合理可靠的。

2. 计算程序开发

反应堆压力容器内各部位压降的确是水力学设计的主要部分,根据主流道的压降等于旁流流道的压降,再通过欧拉公式反推旁流流速,进而可以得到旁流份额。反应堆水力学设计中,认为一回路冷却剂为不可压缩的单相流体。

2.1. 压降模型

反应堆一回路冷却剂的压降计算根据其流道的构成(图 1)可分为如下部分:入口管嘴段、环形下降段、下腔室、堆芯(下管座、格架、燃料棒、上管座)、上堆芯板、上腔室以及出口管嘴段。

压力容器内各部分压降计算由欧拉方程[10]确定:

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

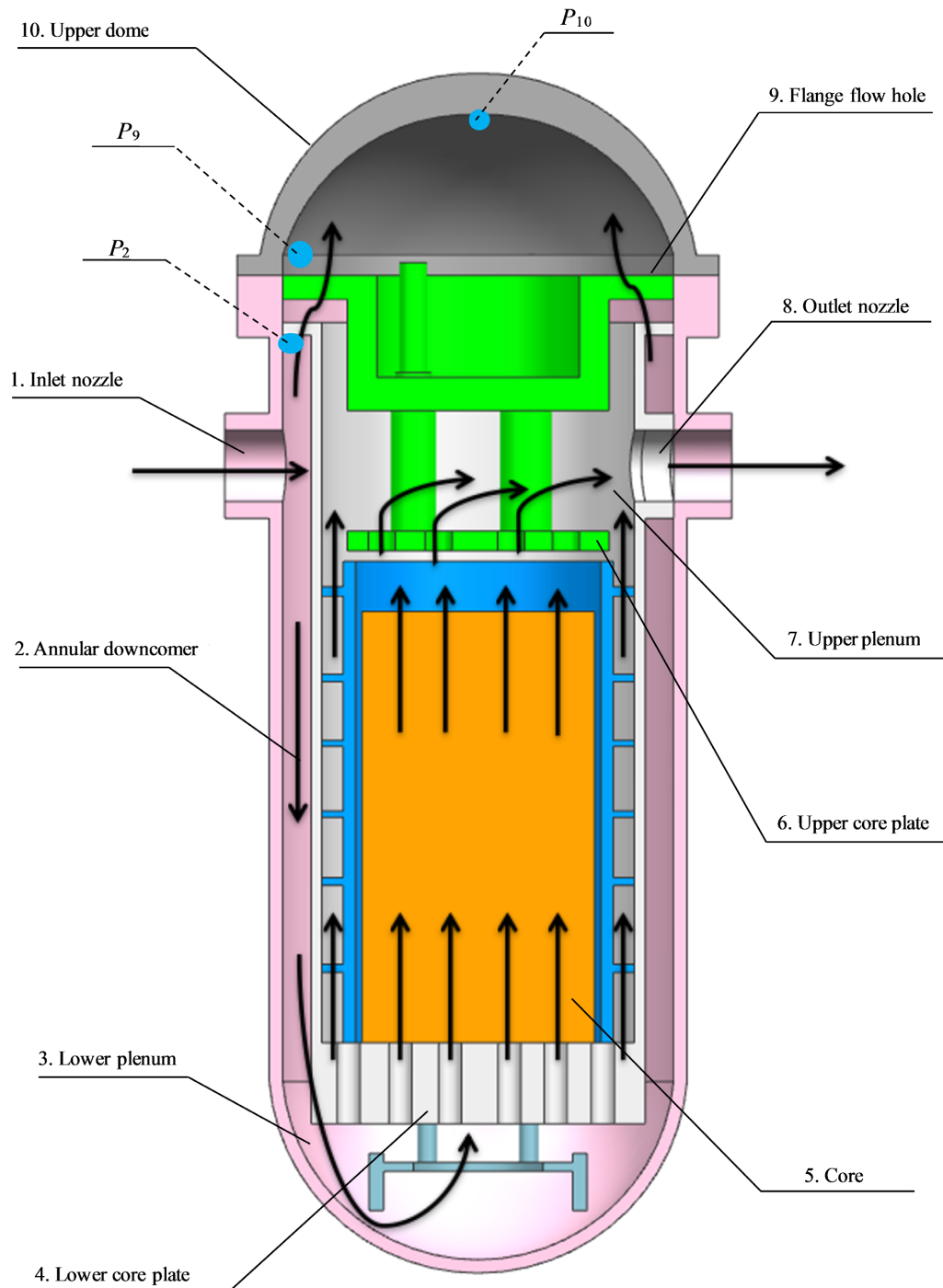
上式中, ΔP 表示压降, MPa; K 表示欧拉系数; V 表示冷却剂的速度, m/s; ρ 表示冷却剂的密度, kg/m³。

2.2. 旁流模型

2.2.1. 上封头冷却旁流计算模块

这股旁流从吊篮法兰流水孔进入上封头,目的是使压力容器上封头内冷却剂温度与冷段温度保持相

同。



Note: 1-inlet nozzle, 2-annular downcomer, 3-lower plenum, 4-lower core plate, 5-core, 6-upper core plate, 7-upper plenum, 8-outlet nozzle, 9-flange flow hole, 10-upper dome.

注：1-入口管嘴段，2-环形下降段，3-下腔室，4-下堆芯板，5-堆芯，6-上堆芯板，7-上腔室，8-出口管嘴，9-法兰流水孔，10-上封头。

Figure 1. Flow diagram in reactor vessel

图 1. 反应堆压力容器结构示意图

上封头旁流压降 ΔP_{upper} :

$$\Delta P_{upper} = P_2 - (P_{10} - P_9) = P_2 - \rho_{IN} g (Z_{10} - Z_9) \quad (2)$$

上封头的旁流份额 $BY1$:

$$BY1 = \frac{NUM \cdot A1}{Q \cdot \rho_{IN}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{upper}}{K1}} \cdot 100 \quad (3)$$

上式中, P_2 表示法兰流水孔上游压力, MPa; Z_{10} 表示上封头顶部的标高, m; Z_9 表示法兰流水孔上表面的标高, m; NUM 表示法兰流水孔喷嘴的数目; $A1$ 表示法兰流水孔喷嘴的参考截面积, m^2 ; $K1$ 表示法兰流水孔喷嘴的压降系数; ρ_{IN} 表示压力容器入口流体密度, kg/m^3 ; Q 表示 RPV 入口流体体积流量, m^3/h 。

通过调整吊篮法兰流水孔的上游压力, 同时确保进出上封头的流量达到平衡, 计算出上封头冷却旁流的份额。

2.2.2. 出口接管旁流计算模块

这股旁流是从压力容器内壁和吊篮管嘴之间的间隙直接流向压力容器出口接管。

出口接管旁流的压降 ΔP_{out} :

$$\Delta P_{out} = \Delta P_{RPV} - \Delta P_{IN} + C1 \cdot \frac{\rho_{OUT} V_{ON}^2}{2} + (C2 - 1) \left[\frac{\rho_{OUT} V_{ON}^2}{2} \cdot \left(\frac{Q}{DV^2 - DOB^2} \right) \right] \quad (4)$$

出口接管的旁流份额 $BY2$:

$$BY2 = \frac{L \cdot GAP \cdot N}{Q} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{out}}{\rho_{IN} \cdot K2}} \cdot 100 \quad (5)$$

上式中, ΔP_{RPV} 表示压力容器总压降, MPa; ΔP_{IN} 表示入口管嘴段压降, MPa; $C1$, $C2$ 表示压降相关系数; N 表示出口管嘴的数目; L 表示出口管嘴间隙的周长, m; $K2$ 表示出口管嘴旁流的压降系数; GAP 表示出口管嘴间隙的宽度, m; DV 表示压力容器内径, m; DOB 表示堆芯吊篮外径, m。

冷却剂从入口管嘴流至出口管嘴有两条途径, 主流道(流经入口管嘴 - 环形下降段 - 下腔室 - 堆芯 - 上腔室 - 出口管嘴)和旁流流道(流经压力容器内壁和吊篮管嘴之间的间隙)。根据主流道和旁流流道的压降相等, 再通过欧拉公式反推, 即可得到出口接管旁流的份额。

2.2.3. 外围空隙旁流计算模块

这股旁流是从堆芯外围组件与金属反射层内壁之间的空隙流至上腔室的。

外围空隙的旁流份额 $BY3$:

$$BY3 = \frac{S}{Q \cdot \rho_{IN}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{AV} \cdot \Delta P_A}{f \cdot \frac{FCL}{D_{er}}}} \cdot 100 \quad (6)$$

上式中, ΔP_A 表示堆芯压降, MPa; f 表示外围间隙的摩擦系数; N 表示出口管嘴的数目; FCL 表示金属反射层的高度, m; D_{er} 表示外围间隙的水力直径, m; ρ_{AV} 表示堆芯处的流体平均密度, kg/m^3 ; S 表示外围间隙的横截面积, m^2 。

冷却剂从下支承板流到上堆芯板的途径包括: 主流道(流经燃料组件)和旁流流道(流经堆芯外围组件 - 金属反射层内壁之间的间隙)。根据主流道和旁流流道的压降相等, 再通过欧拉公式反推, 即可得到出口接管旁流的份额。

2.2.4. 金属反射层旁流计算模块

这股旁流是从金属反射层(如图 2)底板的横向流水孔进入, 经过引流槽和分配腔室, 沿锻件内部的竖直流水孔流至上堆芯板与上腔室。

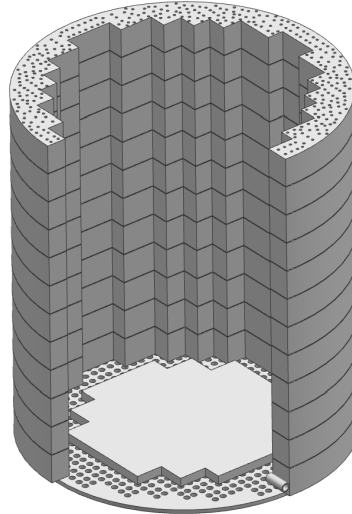


Figure 2. Metal reflector schematic diagram

图 2. 金属反射层示意图

金属反射层旁流压降 ΔP_{RE} :

$$\Delta P_{RE} = K3 \cdot \frac{\rho_{IN} \cdot V_{RE}^2}{2} \quad (7)$$

金属反射层旁流的份额 $BY4$:

$$BY4 = \frac{W_{IN}}{Q \cdot \rho_{IN}} \cdot 100 \quad (8)$$

上式中, $K3$ 表示金属反射层的压降系数; V_{RE} 表示金属反射层内的旁流流速, m/s; W_{IN} 表示金属反射层入口的质量流量, kg/h。

假设一个金属反射层入口流量, 计算出金属反射层的压降。

冷却剂从下支承板流到上堆芯板的途径包括: 主流道(流经燃料组件)和旁流流道(流经金属反射层), 两条流道的压降应当相等。

此时, 堆芯有效流量应当减去金属反射层入口流量, 计算出堆芯侧的压降。

调整金属反射层的入口流量, 使得其压降等于堆芯侧压降, 进而可求得金属反射层旁流的份额。

3. 程序验证

为检验本程序的正确性, 用它对 ACPR1000+反应堆整体水力学实验[11]进行对比分析, 压降计算结果与实验结果的对比分析见图 3。图中部件 1 表示入口管嘴段, 部件 2 表示环形下降段, 部件 3 表示下腔室, 部件 4 表示堆芯, 部件 5 表示上堆芯板, 部件 6 表示上腔室+出口管嘴, 部件 7 表示整个压力容器。

比较结果表明: 计算得到的反应堆压降值与实测压降值之间的误差最大不超过 1%, 这说明程序的水力学计算是可靠的、准确的。

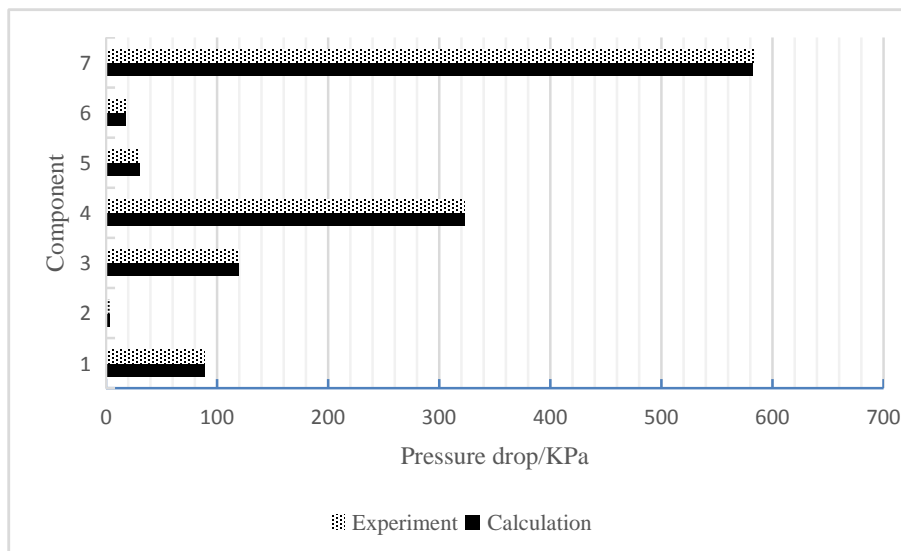


Figure 3. Comparative analysis of pressure drop in different areas
图 3. 不同区域压降对比分析

4. 计算结果分析

压水堆水力学设计的设计基准是确保流经堆芯的最小流量能够带走堆芯产生的热量。在先进压水堆设计中取 93.5% 为流经堆芯的最小流量，即取 6.5% 为反应堆最大旁流份额的设计限值[1]。

4.1. 压降计算

反应堆压力容器与堆芯压降计算中选取的输入参数如下：① 压力：15.5 MPa；② 入口温度：290℃；③ 冷却剂流量：25000 m³/h。

压降计算的目的是确定反应堆压力容器内部各部位的压降，为旁流计算提供输入，计算结果见表 1。

Table 1. Calculation result of pressure drop
表 1. 压降计算结果

部件 Component	压降/kPa Pressure drop/kPa
入口管嘴段 Inlet nozzle	65.6
环形下降段 Annular downcomer	3.3
下腔室 Lower plenum	83.9
堆芯 Core	229.0
上堆芯板 Upper core plate	23.2
上腔室及出口 Upper plenum and outlet	14.2
总压降 Total pressure drop	419.4

4.2. 旁流计算

压力容器内部各部分旁流份额见表 2。

计算结果显示，总旁流份额最大值为 6.238%，小于反应堆的旁流设计限值。

上述计算结果表明, 采用金属反射层后, 反应堆压力容器内的总旁流依然小于旁流设计限值, 金属反射层的结构改进是合理可靠的。

Table 2. Calculation result of bypass share

表 2. 旁流份额计算结果

旁流区域 Bypassregion	最小/% Minimum	最佳估算/% Best estimate	最大/% Maximum
上封头 Upper dome	1.785	1.934	2.135
出口接管 Outlet nozzle	0.000	0.130	0.879
外围空隙 Peripheral gap	0.100	0.220	0.400
金属反射层 Metal reflector	0.630	0.661	0.664
导向管 ^① Guide tubes	1.050	1.830	2.160
总旁流 Total bypass	3.565	4.775	6.238

注: ①导向管旁流由其它程序计算得到。

5. 结论

本文通过建立合理的数学模型, 自主开发的旁流计算程序 ELM, 对反应堆压力容器压降和旁流进行了详细计算, 并与实验结果、数值模拟结果进行了对比分析, 得到以下结论:

- 1) 通过程序计算结果与实验结果、数值模拟结果的对比分析, 证明了自主开发的旁流计算程序 ELM 水力学计算的正确性和有效性。
- 2) 采用金属反射层后, 金属反射层旁流份额最大为 0.664%, 总旁流份额最大值为 6.238%。
- 3) 通过旁流计算结果表明, 先进压水堆的金属反射层设计改进是满足水力学设计基准的, 是合理可靠的。

参考文献

- [1] 李经纬. 秦山核电二期工程反应堆热工水力设计[J]. 核动力工程, 1999, 20(4): 308-312.
- [2] 孙俊, 郑艳华, 李富. 高温气冷堆侧反射层纵向窄缝中的旁流研究[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(7): 1151-1154.
- [3] 杨来生, 宗桂芳. 秦山 600 MW 反应堆旁漏流水力模拟实验研究[J]. 核动力工程, 1999, 20(4): 317-322.
- [4] 焦显凯, 许志红, 等. 控制棒导向管旁流及冷却分析软件开发[J]. 核动力工程, 2021, 42(S1): 99-103.
- [5] 方颖, 张伟, 等. CAP1400 反应堆吊篮与围筒旁通流特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2016, 50(2): 273-276.
- [6] 方颖, 王盛, 李华奇, 等. CNP1000 反应堆围板旁漏流特性实验研究[J]. 原子能科学技术, 2007(S1): 146-150.
- [7] 杨来生, 宗桂芳, 胡俊. 秦山核电二期工程反应堆水力模拟实验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(z1): 208-211+226.
- [8] 陈圣杰, 方健, 等. 基于辐照与热流固耦合的反应堆金属反射层温度分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(1): 6-11.
- [9] 石琳, 方健, 冉小兵, 等. 核反应堆堆内金属反射层旁流分析方法研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(4): 48-51.
- [10] 于平安, 朱瑞安, 等. 核反应堆热工分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002: 86-96.
- [11] 张明乾, 段远刚, 等. ACPR1000⁺反应堆整体水力特性数值分析与比较[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 52-54+60.