

HTR-PM 非能动余热排出系统运行特性分析

王登营¹, 郝琛², 李富²

1. 中国人民解放军 92609 部队, 北京 100077
2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

摘要 非能动余热排出系统是球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)的重要安全系统。由于非能动余热排出系统与堆芯主回路之间通过辐射换热耦合在一起,为了分析事故工况下非能动余热排出系统的运行特性,提出了用区域重叠分解方法实现非能动余热排出系统与主回路系统的耦合计算。基于此方法开发了耦合计算分析工具 TINTE-RHRS,建立了多回路系统模型。应用 TINTE-RHRS 程序模拟了失冷不失压事故下 HTR-PM 余热排出系统的热工水力特性,计算结果验证了堆芯主回路与余热排出系统耦合计算的必要性,分析了事故工况下投入运行列数和环境温度等对系统运行特性的影响。

关键词 球床模块式高温气冷堆;非能动余热排出系统;运行特性

中图分类号 TL364+.4

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.004

Operating Characteristic Analysis of Passive Residual Heat Removal System of HTR-PM

WANG Dengying¹, HAO Chen², LI Fu²

1. 92609 Unit of PLA, Beijing 100077, China
2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The passive residual heat removal system (RHRS) is an important safety system for the HTR-PM reactor. Due to the thermodynamic coupling between the reactor core and the passive RHRS, an overlapping domain decomposition coupling method is employed for the analysis of the operating characteristics of the passive RHRS of the HTR-PM. The software TINTE-RHRS is developed based on this methodology and is used for the coupling calculation, and an integration solution can be obtained for both the primary system and the passive RHRS. The system models are also presented in this paper. The thermal-hydraulic characteristics of the passive RHRS in the pressurized loss of a forced cooling (PLOFC) accident are simulated using the TINTE-RHRS code. The importance of the coupling calculation between the primary system and the passive RHRS is shown; and the effects of the number of operating systems and the air temperature on the operating performance for the passive RHRS are also addressed.

Keywords HTR-PM; passive residual heat removal system; operating characteristic

0 引言

堆芯衰变热非能动载出是球床模块式高温气冷堆(HTR-PM)的关键安全特征。HTR-PM 设计要求在任何事故条件下,反应堆堆芯的剩余发热能够通过非能动的方式载

出,燃料最高温度不超过允许的限值^[1]。

HTR-PM 非能动余热排出系统通过反应堆舱室压力容器与水冷壁之间的换热和堆芯主回路耦合在一起,事故工况下堆芯衰变热和温度分布将影响到余热排出系统的运行;而

收稿日期:2012-05-28;修回日期:2012-06-14

基金项目:国家重大科技专项(ZX06901)

作者简介:王登营,工程师,研究方向为核动力装置安全分析,电子信箱:wang-dy06@mails.tsinghua.edu.cn

余热排出系统的运行工况也将直接影响到堆芯衰变热的载出。因此,事故工况下余热排出系统的运行特性分析涉及到 2 系统之间的耦合。

目前,应用传统的安全分析程序对高温气冷堆安全特性进行分析时,由于程序分析范围限制在反应堆一回路,没有实现与余热排出系统的耦合计算,为了近似模拟余热排出系统对事故进程的影响,一般假定水冷壁温度分布为定温边界^[2-6]。实际上,水冷壁温度在事故进程中不断变化,因此,这是一种非常粗略的近似处理,不能充分考虑 2 系统的相互影响。

在设计余热排出系统的热工水力计算中,一般把压力容器壁面温度作为已知输入条件^[7]。在实际的事故进程中,压力容器壁面温度也是不断变化的,为了掌握事故工况中余热排出系统的载热能力和运行特性,也有必要把安全分析程序和余热排出系统模拟程序耦合计算。

为了更细致地研究 HTR-PM 的安全特性和非能动余热排出系统的运行特性,本文研究了高温气冷堆堆芯分析程序 TINTE 和余热排出系统模拟程序 RHRS 的耦合计算方法,开发了 TINTE-RHRS 程序,该程序考虑了反应堆主回路与非能动余热排出系统的相互影响,可以模拟计算正常运行工况和事故工况下反应堆主回路耦合非能动余热排出系统的热工水力瞬态特性。

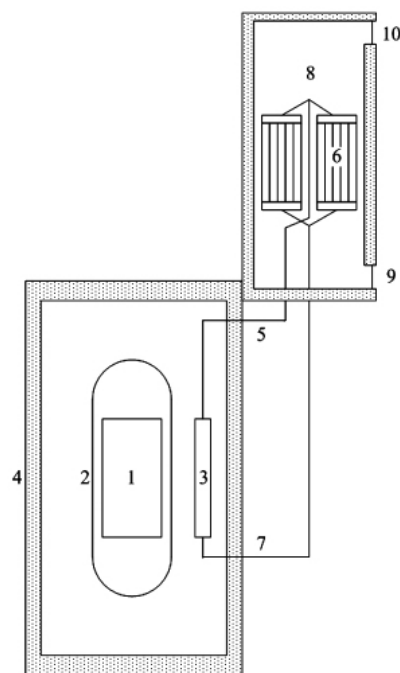
应用 TINTE-RHRS 程序,针对余热排出系统的不同运行工况(运行列数和环境温度),得到了 HTR-PM 在失冷不失压事故(PLOFC)下堆芯燃料元件温度、压力容器温度、水冷壁温度以及余热排出系统载热量等关键参数随时间的变化趋势,分析了不同环境温度和投入列数对 HTR-PM 非能动余热排出系统运行特性的影响。

1 HTR-PM 非能动余热排出系统介绍

非能动余热排出系统是 HTR-PM 重要的安全系统之一,其主要功能包括在反应堆正常运行期间,冷却反应堆舱室,保证混凝土温度低于规定限值;事故工况下,把反应堆剩余发热载出堆舱并输送至最终热阱大气,保证堆内构件及反应堆压力容器温度低于规定限值。

HTR-PM 示范工程为每座反应堆设计了 3 套冗余的余热排出列,每列由自然循环的水回路和自然循环的空冷塔组成,设计要求 2 列正常工作即可完成所规定的余热排出功能^[1]。如图 1 所示,余热排出系统的运行流程是:由于反应堆压力容器外壁温度相对较高,压力容器壁面和水冷壁之间存在较大的温差,热量主要通过二者之间的辐射换热散出,同时舱室内空气的对流传热也传出部分热量;热量传至水冷壁钢板及焊接在钢板间的水冷管;水冷管内的水被加热后,依靠热段和冷段的密度差形成的驱动压头实现水回路的自然循环,进入空冷器管侧并与管外空气进行热交换;管外空气再将热量传递到最终热阱大气。由于 HTR-PM 余热排出系统采用了非能动的设计理念,以自然循环方式将余热载出,具有被动

安全特性和很高的可靠性,从而提高和保证了反应堆的固有安全特性。



1—反应堆堆芯;2—压力容器;3—水冷壁;
4—堆舱混凝土墙;5—热管道;6—空气冷却器;7—冷管道;
8—空冷塔;9—进风口;10—排风口

图 1 HTR-PM 非能动余热排出系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of passive residual heat removal system of HTR-PM

2 分析工具和模型介绍

2.1 TINTE-RHRS 程序

TINTE 程序由德国于利希研究中心开发,主要用于高温气冷堆堆芯中子动力学和热工水力瞬态分析,已在高温气冷堆的热工设计和安全分析中得到广泛应用^[8]。由于传统的安全分析程序没有实现与余热排出系统的耦合计算,其分析范围限制在反应堆一回路。应用 TINTE 程序(或 THERMIX 程序)对高温气冷堆的安全特性进行分析时,一般采用保守假设,即假定水冷壁温度分布为定温边界(比如 70℃),近似模拟余热排出系统对事故进程的影响^[2-6]。实际上,余热排出系统的运行受到堆内余热功率和外界环境空气温度的共同影响,事故进程中水冷壁温度不会维持恒定不变,这种近似处理无法充分考虑 2 系统的相互依存关系。为了更细致地分析高温气冷堆在事故工况下的安全特性,有必要把安全分析程序和余热排出系统模拟程序耦合计算。

RHRS 程序是由清华大学核研院开发的余热排出系统模拟程序^[9]。余热排出系统涉及到舱室、自然循环的水回路和自

然循环的空气回路的相互耦合,其热工水力计算是典型的非线性问题。RHRS 程序以压力容器壁面温度和空冷塔入口空气温度作为边界条件,分别建立了反应堆舱室的辐射和对流模型、水冷管壁导热模型、水回路自然对流模型、空冷器管壁导热模型和空冷塔空气自然对流模型,采用拟牛顿迭代法全局、高效求解上述非线性问题,可用于余热排出系统热工水力特性的计算分析。

在热工水力计算中,RHRS 程序把压力容器壁面温度作为定温边界条件处理^[9]。然而,在实际的事故进程中,压力容器壁面温度除了主要取决于堆内功率和冷却状态影响外,还受到余热排出系统的工作状态影响,比如环境空气温度、投入运行的余热系统列数等。实际上,事故过程中压力容器壁面温度的幅度和分布是随时间不断变化的。因此,为了研究余热排出系统的载热能力和运行特性,也有必要把反应堆主回路和余热排出系统耦合后进行精细模拟计算。

TINTE-RHRS 程序是在高温气冷堆堆芯瞬态分析程序 TINTE 和余热排出系统模拟程序 RHRS 程序的基础上,采用区域重叠分解计算方法开发的,可以实现堆芯主回路与非能动余热排出系统的耦合计算。为了实现 2 程序的耦合计算,考虑到 HTR-PM 主回路系统和余热排出系统之间的松耦合特性,把计算空间分成 2 部分,分别使用独立的 TINTE 程序和 RHRS 程序模拟大系统不同的部分,再通过程序之间传递边界区域数据互为边界条件,来近似考虑不同计算区域的相互依存关系。

计算空间分解时采用交叠区域分解方法^[10-11]。如图 2 所示,TINTE 程序的模型中包含了余热排出系统堆芯舱室的压力容器外壁和水冷壁等,计算时把水冷壁区域设置为定温边界;而 RHRS 模型中也包含了余热排出系统舱室,计算时把压力容器外壁设置为定温边界。图 2 中虚线箭头表示了边界控制体的数据交换。

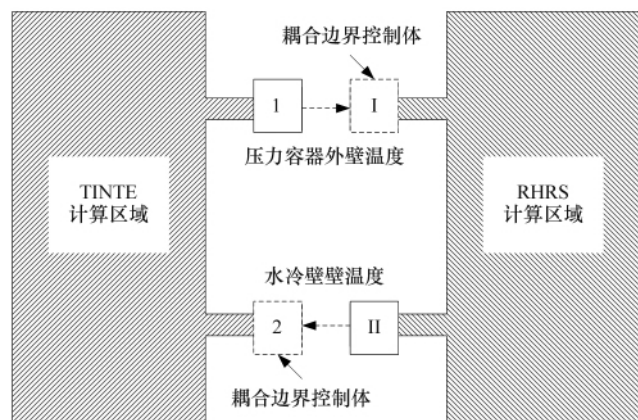


图 2 区域重叠分解方法示意图
Fig. 2 Schematic diagram of overlapping domain decomposition method

2 程序实现耦合计算时,把 TINTE 程序作为主程序,把 RHRS 程序作为从程序。在水冷壁温度作为定温边界条件已知的情况下,TINTE 程序完成主回路温度场计算后,把压力容器外壁温度传递给 RHRS 程序作为定温边界;在压力容器外壁温度作为定温条件已知的情况下,RHRS 程序完成余热排出系统的热工水力计算,然后把计算得到的水冷壁温度传递给 TINTE 作为定温边界。温度场迭代计算收敛后,得到了堆芯主回路和余热排出系统相互耦合的热工水力参数。

2.2 系统模型

为了模拟分析复杂的反应堆堆体的温度场分布,TINTE 程序建立了 HTR-PM 核电站的主回路系统模型(图 3),TINTE 主回路模型中包含了余热排出系统的堆芯舱室部分,包括了压力容器外壁、空气间隙和水冷壁等。为了考虑余热排出系统对水冷壁的冷却作用,模型中把水冷壁温度设置为定温边界条件,但水冷壁温度不是恒定不变的,而是由 RHRS 程序提供。此外,压力容器外壁沿轴向分成 45 个网格,水冷壁沿轴向分成 27 个网格,且网格轴向尺寸非均匀。

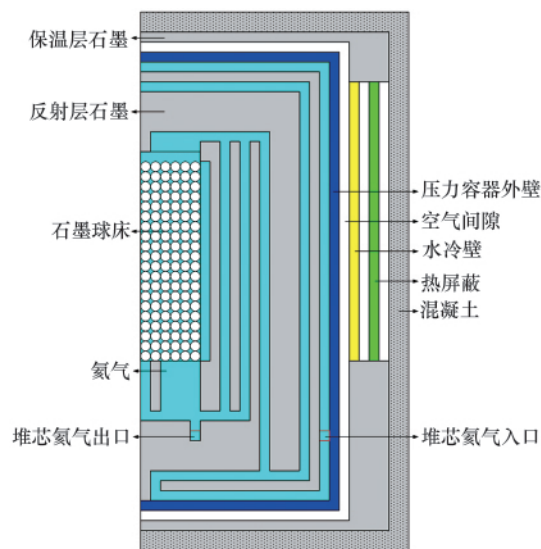


图 3 HTR-PM 主回路 TINTE 模型
Fig. 3 TINTE model of primary loop of HTR-PM

RHRS 程序也建立了详细的余热排出系统模型。如图 4 所示,为了便于与 TINTE 程序进行边界数据交换,反应堆舱室部分按照计算需要也分成 45 个网格,水冷壁分成 27 个网格。节点 46—90 是压力容器外壁面,节点 16—42 是水冷壁,节点 1—15 和 43—45 是水冷壁底面和顶面的绝热墙,节点 91 和节点 92 分别是环形空间的底面和顶面。其中,压力容器外壁面节点 46—90 是整个余热排出系统计算的边界条件,在计算过程中由 TINTE 程序提供压力容器外壁沿轴向的温度分布。图 4 还给出了水冷管壁、水循环回路、空冷管壁、空气循环回路相应的节点划分。

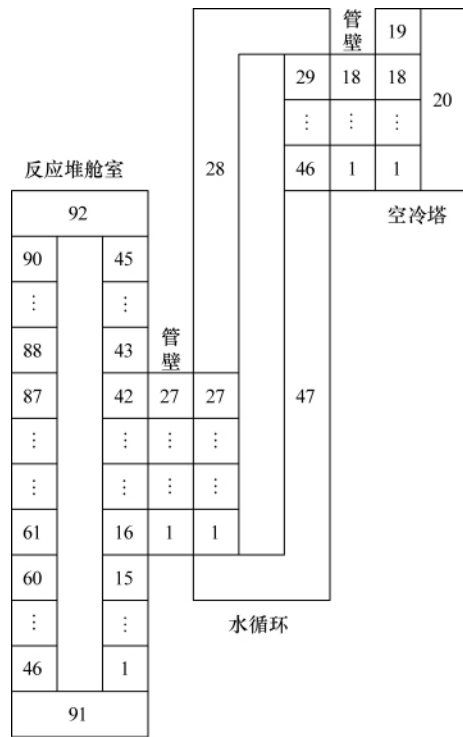


图 4 RHRs 程序余热排出系统模型
Fig. 4 RHRs model of passive residual heat removal system

3 计算结果分析

失去强迫冷却事故是 HTR-PM 反应堆最严重的假想事故之一,按照一回路系统是否失压,可分为失冷不失压 (PLOFC) 和失冷失压 (DLOFC) 事故,其主要差别在于事故后堆内是否建立氦气自然循环。PLOFC 事故发生后,冷却剂能在堆芯形成较强的自然循环,降低了事故后燃料元件的升温幅度,但是也使得堆芯内温度场出现再分布,一般地, PLOFC 事故被堆内构件、压力容器和余热排出系统设计所关注^[6]。本文应用 TINTE-RHRS 程序模拟了 PLOFC 事故下余热排出系统的热工水力特性,分析了不同环境温度和运行列数对 HTR-PM 安全特性和余热排出系统运行特性的影响。

3.1 正常环境温度

余热排出系统正常运行工况下空冷塔入口空气温度为 35℃。发生失冷事故时,可以分别投入运行 1 套、2 套或 3 套余热排出系统。图 5 给出了事故过程中燃料最高温度、压力容器最高温度、水冷壁平均温度和余热排出系统载热量等随时间的变化趋势。

从图 5 可以看出,原始 TINTE 程序模拟此事故时,假定水冷壁平均温度为 70℃定温边界条件下,不能给出余热排出系统的运行特性。而 TINTE-RHRS 程序则给出了余热排出系统投入不同列数的运行特性。事故过程中压力容器最高温度和水冷壁平均温度并非恒定不变,随着余热排出系统投入运行的列数不同,压力容器最高温度和水冷壁平均温度差别明

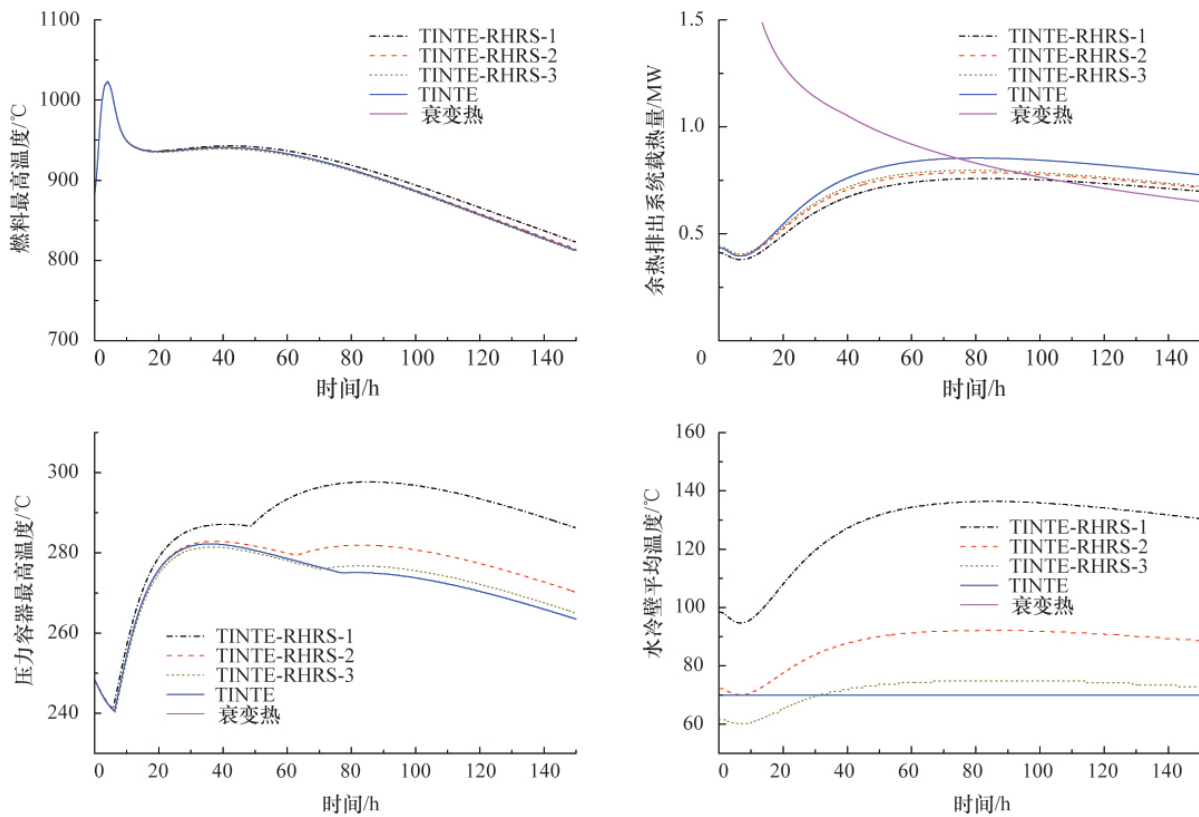


图 5 投入不同列数时 PLOFC 事故计算结果的比较
Fig. 5 Calculation result comparisons of PLOFC accident under different amount of operating systems

显。因此,在安全分析中把水冷壁设为定温边界条件,虽然在一定程度上反映了 HTR-PM 事故工况下的安全特性,但是无法分析研究余热排出系统运行工况对堆芯安全的影响,计算结果证明了开发 TINTE-RHRS 程序的必要性。

为了进一步研究余热排出系统的运行特性,表 1 给出了正常环境温度下,PLOFC 事故后第 80h 时投入不同列余热排出系统的计算结果,此时余热排出系统负荷达到最大值。可以看出,余热排出系统投入运行的列数不同,水循环回路流量、换热系数和载热量也不同。2 套或 3 套余热排出系统投入运行时,余热排出系统的载热能力较强,能够有效降低压力容器壁面温度和水冷壁温度,对反应堆安全有利;单套余热排出系统投入运行时,其载热能力显著减弱,水冷壁温度明显高于 2 套和 3 套工作时的结果,但是燃料最高温度和压力容器最高温度都未超过规定限制,这说明自然循环的余热排出系统具有很强的自调节特性。

表 1 正常环境温度 PLOFC 事故后第 80h 计算结果
Table 1 Calculation results of 80th hour after PLOFC accident at normal environment temperature

参数	1 列	2 列	3 列
余热排出系统载热量/kW	757.8	786.4	796.4
压力容器最高温度/°C	297.6	281.8	276.7
水冷壁钢板最高温度/°C	143.4	96.0	77.7
水冷管水流速/(m·s ⁻¹)	0.075	0.056	0.047
水冷管出口水温/°C	110.3	82.8	71.5
水冷管入口水温/°C	93.3	71.3	62.4
空冷塔空气流速/(m·s ⁻¹)	0.520	0.412	0.358
空气出口温度/°C	98.5	75.2	65.6
空气入口温度/°C	35.0	35.0	35.0

3.2 极端高温工况

根据气象统计资料,HTR-PM 厂址最高温度约为 40°C,最低温度约为-20°C,这 2 种情况都属于极端气象工况^[7]。非能动余热排出系统在极端高温工况下运行时,由于空冷塔入口空气温度较高,不利于堆芯热量的载出,水循环回路可能会出现沸腾的现象。应用 TINTE-RHRS 程序分别模拟了极端高温工况下分别投入运行 1 列、2 列和 3 列余热排出列的运行情况。

如表 2 所示,在极端高温工况下,尽管只投入 1 套余热排出系统时的压力容器温度、水冷壁温度较高,但水冷壁出口水温仍低于沸点 135°C(对应 0.3MPa 工作压力),余热排出系统仍可以正常运行。上述计算结果证明,HTR-PM 非能动余热排出系统具有很大的设计裕量,能够在事故工况下保证反应堆堆芯安全。

3.3 极端低温工况

余热排出系统在极端低温工况下运行时,由于空冷塔入口空气温度较低,虽然有利于堆芯热量的载出,但是水循环

表 2 极端高温工况 PLOFC 事故后第 80h 计算结果
Table 2 Calculation results of 80th hour after PLOFC accident in extremely hot environment

参数	1 列	2 列	3 列
余热排出系统载热量/kW	754.8	783.9	793.8
压力容器最高温度/°C	297.7	283.4	278.1
水冷壁钢板最高温度/°C	148.5	101.1	82.7
水冷管水流速/(m·s ⁻¹)	0.075	0.057	0.048
水冷壁出口水温/°C	115.7	88.1	76.7
水冷壁入口水温/°C	99.0	76.7	67.8
空冷塔空气流速/(m·s ⁻¹)	0.52	0.412	0.358
空气出口温度/°C	104.3	80.7	71.1
空气入口温度/°C	40	40	40

回路可能会出现结冰现象。应用 TINTE-RHRS 程序计算发现,2 列或 3 列余热排出系统投入运行时,即使在系统满功率运行时,由于空冷塔入口温度较低,水循环回路温度也较低,尤其是空冷管内的冷却水温度低于 0 时,TINTE-RHRS 程序无法完成计算而退出;当 1 列余热排出系统投入运行时,整个事故进程中水循环回路不会出现结冰,余热排出系统可以正常运行。

所以,在冬季极端气候条件下,应该随时监控水冷壁温度,必要时通过调节百叶窗开度、关闭进风门等措施,提高塔内空气温度,从而避免空冷管内冷却水温度过低造成空冷器管结冰冻裂。

4 结论

本文应用 TINTE-RHRS 程序对 HTR-PM 发生 PLOFC 事故时非能动余热排出系统的运行特性进行了分析,主要结论如下。

(1) HTR-PM 堆芯主回路与非能动余热排出系统通过压力容器外壁与水冷壁联结在一起,堆芯衰变热的载出、压力容器外壁温度、水冷壁温度和余热排出系统的运行工况相互影响,必须实现堆芯主回路与余热排出系统的耦合计算。

(2) HTR-PM 非能动余热排出系统具有很强的自调节特性和很大的设计裕量。尽管 HTR-PM 设计要求至少 2 列余热排出系统运行,但分析表明,正常环境温度和极端高温工况下,1 列、2 列或 3 列余热排出系统投入运行都可把堆芯衰变热及时排出,保证燃料最高温度和压力容器外壁温度不超过规定限值。

(3) 极端高温下,非能动余热排出系统投入 1 列、2 列或 3 列时均可正常工作,水循环回路不会出现沸腾情况。

(4) 极端低温工况下,非能动余热排出系统投入 1 列可维持正常运行;投入 2 列或 3 列水循环回路会结冰,所以 HTR-PM 非能动余热排出系统在冬季运行时应该采取措施避免空冷管内冷却水温度过低。

参考文献 (References)

- [1] 清华大学核能技术设计研究院. 华能山东石岛湾核电厂高温气冷堆核电站示范工程初步安全分析报告[R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 2008.
Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University. Preliminary safety analysis report for the high temperature gas cooled reactor demonstration power plant of Huaneng Shandong Shidao Bay nuclear power plant [R]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 2008.
- [2] Cleveland J C, Greene S R. Application of the THERMIX-KONVEK code to accident analyses of modular pebble bed high temperature reactors [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-9905, 1986.
- [3] Nuclear Power Technology Development Section. Decay heat removal and heat transfer under normal and accident conditions in gas cooled reactors [R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-757, 1994.
- [4] Ball S J, Conklin J C. Modular high-temperature gas-cooled reactor simulation using parallel processors [R]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, CONF-890555-5, 1989.
- [5] 邱江. 10MW 实验高温气冷堆安全特性分析 [M]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1989.
Qiu Jiang. Analysis of safety characteristics of 10MW test high temperature gas-cooled reactor [M]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 1989.
- [6] 石磊, 郑艳华. 球床模块式高温气冷堆失冷事故特性研究 [J]. 原子能科学技术, 2009, 43(S1): 236-239.
Shi Lei, Zheng Yanhua. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(S1): 236-239.
- [7] 清华大学核能技术设计研究院. HTR-PM 余热排出系统设计说明书 [R]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 2008.
Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University. Design specification for the residual heat removal system of HTR-PM demonstration power plant [R]. Beijing: Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, 2008.
- [8] Gerwin H, Scherer W, Teuchert E. The TINTE modular code system for computational simulation of transient process in the primary circuit of a pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 1989, 103: 302-312.
- [9] 贺东钰. HTR-PM 余热排出系统数值模拟[M]. 北京: 清华大学核能与新能源设计研究院, 2010.
He Dongyu. Simulation of residual heat removal system in HTR-PM[M]. Beijing: Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, 2010.
- [10] Weaver W L, Tomlinson E T, Aumiller D L. A generic semi-implicit coupling methodology for use in RELP5-3D [J]. *Nuclear Science and Design*, 2002, 211(1): 13-26.
- [11] Elleithy W M, Al-Gahtani H J. An overlapping domain decomposition approach for coupling the finite and boundary element methods [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2000, 24: 391-398.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)

· 学术动态 ·



“第二届全国益生菌与食品微生物学 学术会议”征文

由中国微生物学会主办,上海海洋大学、上海市微生物学会、上海市食品学会、上海市预防医学会承办的“第二届全国益生菌与食品微生物学学术会议”,将于2012年09月25—28日在上海市举行。

征文范围:(1) 益生菌研究;(2) 食品微生物检测与控制技术;(3) 食品微生物风险评估研究;(4) 食品微生物资源及利用;(5) 食品微生物学研究与应用的新方法和新技术;(6) 食品安全研究。

论文截止日期:2012年7月31日

联系电话:021-61900503

电子邮箱:foodmicro@163.com

通信地址:上海市浦东新区临港新城沪城环路999号上海海洋大学食品学院(201306)

会议网站:<http://csm.im.ac.cn/templates/team/introduction.aspxnodeid=9&page=ContentPage&contentid=288>