

高温气冷堆蒸汽发生器事故排放过程的动态模拟与分析^①

贾艳波^② 柳雄斌 吴莘馨

(清华大学 核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘要 研究了高温气冷堆(HTGR)蒸汽发生器事故排放过程的动态特性。把事故排放过程分为水排放和蒸汽排放两个阶段,对两个阶段分别建立了集总参数模型。在典型事故排放工况下,计算了蒸汽发生器排放温度、排放压力、排放比焓和排放流量随时间的变化。计算结果表明,事故排放系统可在 6.175s 内将 HTGR 蒸汽发生器二回路压力降低到一回路的压力水平,在事故排放结束时,蒸汽发生器仍然处于水排放阶段。计算得到的蒸汽发生器排放比焓和排放流量随时间变化的曲线为今后事故排放系统的排放罐内流动和传热的数值模拟提供了输入条件。

关键词 高温气冷堆(HTGR), 蒸汽发生器, 事故排放过程, 集总参数模型

0 引言

高温气冷堆 (high temperature gas-cooled reactor, HTGR) 蒸汽发生器没有事故排放系统, 用于在断管等事故时紧急排出蒸汽发生器二回路侧的水和蒸汽, 降低二回路侧的压力, 避免水和蒸汽进入一回路造成反应性升高。为研究反应堆的安全性, 有必要建立蒸汽发生器事故排放过程的动态模型。

HTGR 直流蒸汽发生器的动态模型可分为集总参数模型和分布参数模型, 按照换热区域间边界处理方法的不同, 又可以分为固定边界模型和移动边界模型。研究人员利用动态模型进行了各种研究。Moody^[1]用集总参数模型研究了大容器内两相工质的泄放问题, 但是在 Moody 模型中, 容器压力的变化速率需要用物性参数对压力的一阶导数值来计算, 给编程和计算造成较大不便。Tzanos^[2]提出了分布参数移动边界模型来处理不同换热区域之间的边界移动问题, 这一模型将各区域间的边界位置作为待求解的变量之一, 与温度、压力等变量同时求解。程铁平^[3]改进了移动边界模型的数值稳定性。易维竟^[4]比较了蒸汽发生器的固定边界模型和移动边界模型。黄晓津^[5,6]分别用固定边界模型和移动边界模型计算了 10MW 高温气冷实验堆螺旋管式直流蒸汽发生器的动态工作特性。黄山松^[7]用

固定边界模型计算了 10MW 高温气冷实验堆螺旋管式直流蒸汽发生器的阶跃响应特性和斜坡输入特性。张伟^[8]和李海鹏^[9]提出了一种直流蒸汽发生器的集总参数移动边界模型。但是上述研究^[2,9]仅计算了正常功率运行范围内的蒸汽发生器动态工作特性, 而未考虑蒸汽发生器的事故工况。

在蒸汽发生器的事故排放过程中, 蒸汽发生器内的速度场和压力场变化很大, 并且蒸汽发生器内原有的过冷水段、两相段和过热蒸汽段等不同换热区域间的边界将在短时间内快速移动甚至消失, 现有的移动边界模型难于处理换热区域边界变动很大的工况, 而固定边界模型对空间步长和时间步长都有苛刻的要求^[4]。本文针对蒸汽发生器事故排放系统的特点, 改进了 Moody 的集总参数模型, 使之能够有效地用于 HTGR 蒸汽发生器的事故排放工况。

1 系统数学模型

HTGR 蒸汽发生器事故排放系统的示意图见图 1。系统由蒸汽发生器、排放管道及排放罐三部分组成。蒸汽发生器为螺旋管直流式蒸汽发生器, 管外为一次侧氦气, 管内为二次侧的水和蒸汽。在稳态工况时, 蒸汽发生器二回路下部为过冷水, 中部为

① 国家科技重大专项资助项目。

② 男, 1985 年生, 硕士, 研究方向: 反应堆工程; 联系人, E-mail: 1jyb1@163.com
(收稿日期: 2010-11-10)

两相状态,上部为过热蒸汽。当蒸汽发生器发生断管等事故时,主给水隔离阀快速关闭,事故排放阀快速打开,二回路的过冷水通过事故排放阀向排放罐排放。主蒸汽隔离阀在 10s 内保持打开状态,10s 之后关闭,过热蒸汽在主蒸汽隔离阀关闭之前以不变的速率通过主蒸汽隔离阀进行排放。随着排放的进行,二回路压力逐渐下降。当二回路水和蒸汽的压力下降到与一回路氦气的压力平衡时,事故排放阀关闭,事故排放结束。

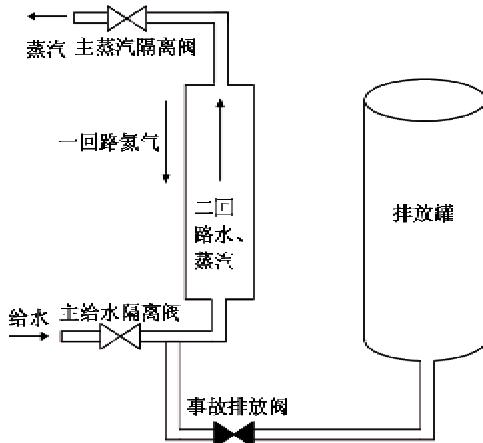


图 1 蒸汽发生器事故排放系统示意图

本研究对上述事故排放过程做了以下简化:

(1) 蒸汽发生器发生断管事故时,不考虑蒸汽发生器二次侧的水或蒸汽从破口向一回路的排放。在事故排放时,二回路和一回路之间的热交换可忽略。

(2) 忽略蒸汽发生器各根螺旋管之间热工参数的不均匀性。

(3) 将蒸汽发生器分为水段和蒸汽段,其中水段位于蒸汽发生器的下半部分,蒸汽段位于上半部分。由于事故排放阀位于蒸汽发生器的下方,因此蒸汽发生器下方的水首先通过事故排放阀向排放罐内排放,在水排放完毕后,蒸汽开始向排放罐排放。

(4) 当蒸汽发生器同时存在水段和蒸汽段时,认为水和蒸汽处于饱和平衡状态;当蒸汽发生器仅有蒸汽段时,认为蒸汽处于饱和状态或过热状态。

(5) 在 $t < 0$ 时蒸汽发生器处于稳态工况,在 $t = 0$ 时蒸汽发生器发生破管事故,事故排放阀迅速打开。蒸汽发生器内的水在 $t = t_1$ 时刻完全泄空。时间段 $t \in [0, t_1]$ 可称为蒸汽发生器的水排放阶段,时间段 $t \in [t_1, t_{end}]$ 可称为蒸汽排放阶段, t_{end} 是蒸汽发生器二回路压力降低到一回路压力的时间。以下分别讨论两个阶段的数学模型。

1.1 水排放阶段的数学模型

蒸汽发生器的过冷水首先排向排放罐。在水排放过程中,蒸汽发生器二回路的连续方程为

$$\frac{dM}{dt} = -m_s - m_r \quad (1)$$

其中 M 是蒸汽发生器内水和蒸汽的总质量, m_s 是蒸汽通过主蒸汽隔离阀的排放速率, m_r 的表达式为

$$m_r = \begin{cases} 96 \text{ kg/s}, & t \leq 10 \text{ s} \\ 0, & t > 10 \text{ s} \end{cases} \quad (2)$$

m_r 是水通过事故排放阀的排放速率。分析表明,当蒸汽发生器中高温高压的水或蒸汽向常温常压的排放罐内排放时,排放管道上将发生临界流现象。两相临界流的流量 m_r 由上游蒸汽发生器内参数决定,而与下游排放罐内参数无关。本文选用 Fauske 模型^[10]计算排放管道上的两相临界流量 m_r :

$$\frac{m_r}{A_{min}} = \rho' \sqrt{2[h_0 - \chi h_g - (1 - \chi) h_f]} \quad (3)$$

式中变量 ρ' 和质量含气率 χ 具体计算方法参照文献[10], A_{min} 是排放管道上的最小截面积, h_0 为蒸汽发生器饱和水比焓, h_g 和 h_f 分别是临界流发生处的饱和蒸汽比焓和饱和水比焓。其中临界流发生处的参数可以通过临界流发生处的压力 P_c 来确定,发生长管临界流时 P_c 为上游蒸汽发生器压力的 0.55 倍^[11]。

蒸汽发生器二回路的能量方程为

$$\frac{dE}{dt} = -m_s h_v - m_r h_L \quad (4)$$

其中 E 是蒸汽发生器内水和蒸汽的总内能, h_L 是水的比焓, h_v 是蒸汽的比焓,二者都可以表示成蒸汽发生器压力 P 和蒸汽发生器温度 T 的函数:

$$h_v = h_v(P, T) \quad (5)$$

$$h_L = h_L(P, T) \quad (6)$$

为使方程组封闭,须引入一些辅助关系式。总质量 M 可表示为水质量 M_L 和蒸汽质量 M_v 之和:

$$M = M_L + M_v \quad (7)$$

蒸汽发生器、主给水管道及主蒸汽管道的总体积 V 是水所占体积与蒸汽所占体积之和:

$$M_L/\rho_L(P, T) + M_v/\rho_v(P, T) = V \quad (8)$$

其中 ρ_L 是水的密度, ρ_v 是蒸汽的密度,二者也是 P 与 T 的函数。

水和蒸汽的总内能 E 满足

$$E = M_L h_L + M_v h_v - PV \quad (9)$$

由于蒸汽发生器同时存在水和蒸汽,因此认为水和蒸汽处于饱和平衡状态,温度与压力一一对应:

$$T = T(P) \quad (10)$$

方程(1) - (10) 10 个方程有待解变量 M 、 m_s 、

m_r 、 M_L 、 M_v 、 E 、 P 、 h_r 、 h_v 和 T 共 10 个,至此水排放过程模型建立完毕。

与 Moody^[1] 建立的集总参数模型相比,本文的集总参数模型不需要用到物性参数对压力的一阶导数值,只需要知道物性参数与压力、温度的函数关系式(5)、(6)和(10)等即可,这就大大简化了编程的工作量,同时也提高了物性参数计算的准确性。

1.2 蒸汽排放阶段的数学模型

当蒸汽发生器的过冷水完全排到排放罐后,蒸汽发生器二回路压力仍有可能大于一回路压力,此时蒸汽将继续向排放罐排放。在蒸汽排放阶段,蒸汽发生器二回路的连续方程为

$$dM_v/dt = -m_r - m_v \quad (11)$$

能量方程为

$$dE/dt = -m_r h_r - m_v h_v \quad (12)$$

蒸汽在排放管道上的临界流量可表示为

$$m_v = A_c \rho_c c \quad (13)$$

其中 A_c 和 ρ_c 分别为发生蒸汽临界流处管道截面和蒸汽密度, c 为单相蒸汽临界速度^[12] $c = \sqrt{2[h_c - h_{cr}]}.$

为使方程组封闭,引入辅助关系式。总体积 V 满足

$$M_v / \rho_v (P, T) = V \quad (14)$$

总内能 E 与比焓 h_v 的关系为

$$E = M_v h_v - PV \quad (15)$$

由于蒸汽处于过热状态,蒸汽温度可表示为压力 P 和焓 h_v 的函数:

$$T = T(P, h_v) \quad (16)$$

方程(11)~(16)加方程(2)共有 7 个方程,待解变量 m_r 、 m_v 、 M_v 、 E 、 P 、 T 和 h_v 共 7 个,至此蒸汽排放过程模型建立结束。

1.3 初始条件

初始状态下二回路压力为 14MPa,含水量 $M_L = 5.14\text{t}$,含汽量 $M_v = 0.83\text{t}.$

2 计算结果及讨论

编程求解了以上的蒸汽发生器水排放阶段和蒸汽排放阶段的动态模型。图 2 至图 5 是计算得到的蒸汽发生器排放压力、排放温度、排放管道入口比焓及排放速率随时间的变化曲线。

图 2 表明,随着蒸汽发生器内的水和蒸汽不断地从事故排放阀和主蒸汽隔离阀排出,蒸汽发生器二回路压力随时间逐渐减小,在 6.175s 时,蒸汽发

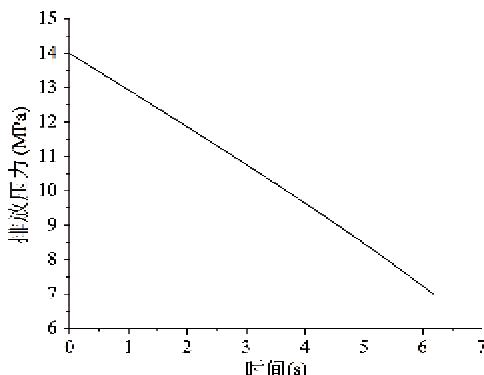


图 2 蒸汽发生器排放压力随时间的变化

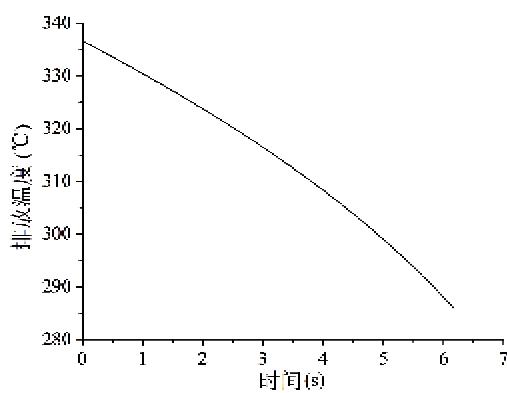


图 3 蒸汽发生器排放温度随时间的变化

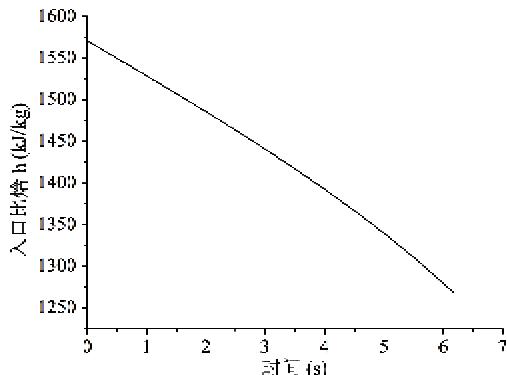


图 4 排放管道入口比焓随时间的变化

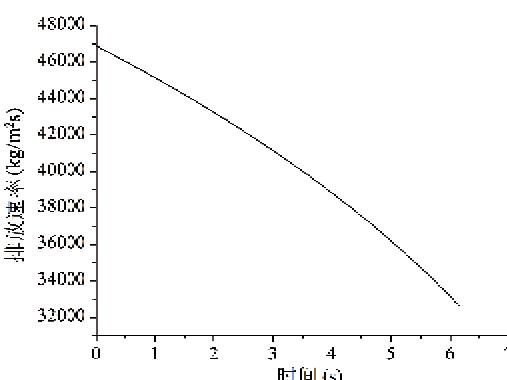


图 5 排放速率随时间的变化

生器二回路的压力降低到 7MPa，即与一回路压力相同，事故排放结束。

图 3 表明，蒸汽发生器的排放温度随时间逐渐降低，其原因是本文假设蒸汽发生器水和蒸汽共存时处于饱和状态。随着蒸汽发生器内饱和压力的下降，事故排放管道的入口温度也随之下降。在排放结束时，事故排放管道的入口温度约 287℃。

图 4 表明，事故排放管道入口比焓随时间逐渐减小，并且事故排放管入口比焓一直是蒸汽发生器内的饱和水焓。可见当二回路压力降低到 7MPa 时，蒸汽发生器内的水尚未排完。排放结束时，事故排放管入口水的比焓约为 1270 kJ/kg。

图 5 表明，随着蒸汽发生器内温度和压力的逐渐降低，蒸汽发生器的事故排放速率也随时间逐渐降低，排放终止时排放速率约为 $33000 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ 。

3 结 论

本文建立了 HTGR 蒸汽发生器事故排放过程的动态模型，模拟了在典型事故排放工况下，蒸汽发生器的事故排放压力、排放温度、排放比焓和排放流量随时间的变化规律。计算表明，在给定的高温气冷堆蒸汽发生器事故工况下，蒸汽发生器二回路压力可在 6.175s 降低到一回路压力水平，事故排放结束；蒸汽发生器内的过冷水在事故排放结束时尚未排空，没有发生过热蒸汽通过排放管道排入排放罐的过程。计算获得了事故排放管道的入口比焓与排

放流量随时间变化的曲线，这一结果的获得为数值模拟排放罐内的流场和温度场提供了前提条件。

参 考 文 献

- [1] Moody F J. Maximum two-phase vessel blowdown from pipes. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1966, 88(3): 285-295
- [2] Tzanos C P. A movable boundary model for once-through steam generator analysis. *Nuclear Technology*, 1988, 82(1): 5-17
- [3] 程铁平, 崔震华. 可连续移动相边界的直流式蒸汽发生器模型. 核动力工程, 2000, 21(03): 197-201
- [4] 易维竞, 李长顺, 魏仁杰. 固定边界与移动边界直流蒸汽发生器模型的比较. 核科学与工程, 2002, 22(04): 314-317
- [5] 黄晓津, 冯元琨, 郭人俊. HTR-10 螺旋管式直流蒸汽发生器的动态数学模型. 高技术通讯, 2001, (01): 96-99
- [6] 黄晓津, 冯元琨, 郭人俊. HTR-10 螺旋管直流蒸汽发生器实时动态模型. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(6): 88-90
- [7] 黄山松, 黄晓津, 冯元琨等. HTR-10 直流蒸汽发生器动态特性的仿真研究. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(6): 88-90
- [8] 张伟, 边信黔, 夏国清. 套管式直流蒸汽发生器动态特性仿真研究. 核科学与工程, 2006, 26(02): 103-107
- [9] 李海鹏, 黄晓津, 张良驹. 螺旋管式直流蒸汽发生器的集总参数动态模型. 原子能科学技术, 2008, 42(08): 729-733
- [10] 俞冀阳, 贾宝山. 反应堆热工水力学. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003. 150-156
- [11] 徐济鳌. 沸腾传热和气液两相流动. 北京: 原子能出版社, 2001. 157-159
- [12] 曾丹苓, 熬越, 朱克雄等. 工程热力学. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1980. 321-322

Simulation and analysis of the emergency relief process of HTGR steam generator

Jia Yanbo, Liu Xiongbin, Wu Xinxin

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

The dynamic behavior of the emergency relief process of the high temperature gas-cooled reactor (HTGR) steam generator was investigated. The emergency relief process was divided into a water relief stage and a steam relief stage, and two lumped parameter models were developed for the two stages. In a typical emergency relief condition, the variations of the discharge temperature, the discharge pressure, the discharge specific enthalpy and the discharge flow rate with time of the steam generator were calculated. The results show that the emergency relief system can reduce the secondary loop pressure of the HTGR steam generator to the pressure of the primary loop within 6.175 seconds, and the HTGR steam generator remains in the water relief stage at end of discharge process. The calculated time variations curves of discharge specific enthalpy and discharge flow rate of the steam generator can be used as input conditions for future numerical simulation of the heat transfer and fluid flow inside the relief tank of an emergency relief system.

Key words: high temperature gas-cooled reactor (HTGR), steam generator, emergency relief process, lumped parameter model