



## (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105225710 B

(45)授权公告日 2017.06.23

(21)申请号 201510531962.4

(22)申请日 2015.08.26

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105225710 A

(43)申请公布日 2016.01.06

(73)专利权人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72)发明人 刘艳军 黄志强 袁娇 吴国凤

何霞 马欣 于春雨

(74)专利代理机构 北京众合诚成知识产权代理

有限公司 11246

代理人 裴娜

(51)Int.Cl.

G21C 17/00(2006.01)

(56)对比文件

US 5331677 A, 1994.07.19, 全文.

CN 1050460 A, 1991.04.03, 全文.

彭钢, 李冬生. 一体化先进压水堆小型核电站堆芯燃料管理设计.《核动力工程》.2008, 第29卷(第2期), 第39-42页.

侯斌等. 核电厂一回路系统模拟实验设计与分析.《原子能科学技术》.2010, 第44卷第172-176页.

审查员 黄小东

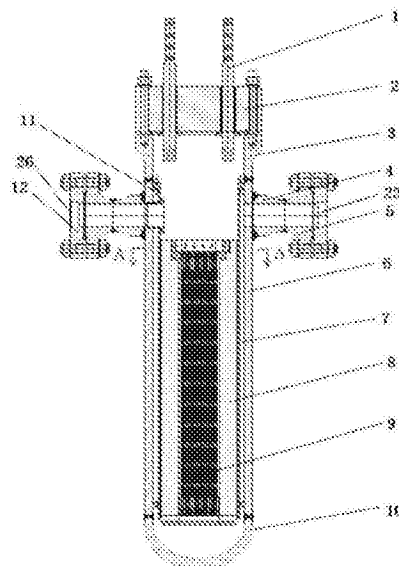
权利要求书2页 说明书10页 附图4页

(54)发明名称

循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法

(57)摘要

本发明公开了一种循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法,包括堆芯模拟体的设计要求、结构设计、相似比例分析和设计,以及蒸汽发生器模拟体的设计要求、结构设计和设计结果,该方法根据自然循环实验回路的设计参数和功能需求,确定实验回路系统堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体的设计要求,再分别对堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体进行设计和分析计算。本发明提高了超设计基准事故设置的措施的可靠性和核电厂安全系统的多样化,具有很高的工程价值。



1. 一种循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法, 其特征在于, 所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法包括堆芯模拟体的设计要求、结构设计、相似比例分析和设计, 以及蒸汽发生器模拟体的设计要求、结构设计和设计结果, 该方法根据自然循环实验回路的设计参数和功能需求, 确定实验回路系统堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体的设计要求, 再分别对堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体进行设计和分析计算;

堆芯模拟体的设计以ACPR1000为原型, ACPR1000堆芯有157盒燃料组件, 该堆芯模拟体模拟其中的一盒燃料组件, 高度比取1:4, 速度比为1:2, 电加热元件的表面热流密度比为2:1;

堆芯模拟体包括铜棒、平盖、筒体端部、进出口接头、进出口法兰、筒体、吊篮、陶瓷、燃料组件模拟件、下封头、挂环、进出口反法兰;

燃料组件模拟件通过吊篮悬挂于挂环上, 平盖上装有2根铜棒, 铜棒中的两根铜棒一端分别和电源的正负极相连, 另一端与燃料组件模拟件相连;

组件模拟件和金属吊篮之间用陶瓷填充。

2. 如权利要求1所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法, 其特征在于, 堆芯模拟体堆芯模拟体管道用长度、水力学当量直径和流通截面积体现其流速、流动阻力。

3. 如权利要求1所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法, 其特征在于, 堆芯模拟体设计中的无量纲动量方程为:

$$\Pi_R \Delta \rho^+ l_{hc} = \sum_i \frac{l_i^+}{A_i^+} \frac{\partial u_{in}^+}{\partial \tau} + \frac{1}{2} (u_{in}^+)^2 \Pi_F + (u_{in}^+)^2 \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right)$$

无量纲能量方程为:

$$\left( \frac{\rho^+}{\rho_{in}^+} \right) \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial x}{\partial s} = \Pi_{pch} q^+ - \Pi_C \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

动量和能量方程中无量纲参数的定义分别为: Richardson数  $\Pi_{Ri} = \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_{in} u_0^2}$ , 表征浮升

力与惯性力之间的关系; 阻力系数  $\Pi_{Fi} = \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_r^+}{\rho_i^+} \right) \times \left( \frac{f}{d_h} + K \right)_i$ , 表征回路的摩擦和形

阻; 热源数也称相变数  $\Pi_H = \frac{q_0 l_{hc0} \xi}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} = \Pi_{pch}$ , 表征燃料元件释热对回路焓升的影响; 热容数

$\Pi_C = \frac{\rho c_v \Delta T_0}{\rho_0 h_{fg}}$ , 表征结构的热容量与回路焓升的关系。

4. 如权利要求1所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法, 其特征在于, 堆芯模拟体设计中的无量纲相变数为:

$$\Pi_{pch} = \frac{q_0 l_{hc0} \xi_i}{\rho_0 u_0 A_0 \Delta h_{fg}} \left( \frac{\Delta \rho_{fg}}{\rho_g} \right)$$

无量纲过冷度数为:

$$\Pi_{sub} = \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \left( \frac{\Delta \rho_{fg}}{\rho_g} \right)。$$

5. 如权利要求1所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法,其特征在于,蒸汽发生器模拟体对蒸汽发生器进行模化,换热管高度比取1:4,采用原型的换热管径以及栅距,蒸汽发生器一次侧和二次侧的温度和压力都与原型一致,根据原型中蒸汽发生器的换热能力和换热面积,模化得到实验回路中蒸汽发生器的换热面积及换热管的结构尺寸;

蒸汽发生器模拟体包括上封头、端壳体、换热管、下端壳体、下封头,换热管通过固定管板固定于下端壳体上,换热管的不同位置装有足够数量的支撑板和挡板,下封头被隔板隔开隔开。

6. 如权利要求1所述的循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法,其特征在于,堆芯模拟体采用长1050mm,外径9.5mm的不锈钢管作为加热元件,电加热元件采用定位格架固定,定位格架拟采用原型中的定位格架,电加热元件的上下端和铜板相连,铜板分别和电源的正负极相连,堆芯模拟体的进出口管道用内径为105mm的不锈钢管,位置按原型布置,电加热元件和压力容器之间用陶瓷填充。

## 循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于反应堆热工水利领域,尤其涉及一种循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法。

### 背景技术

[0002] 反应堆可以利用自然循环不依赖外部动力就将热量导出的能力,实现反应堆非能动安全设施在事故下的运行,从而提高反应堆的安全性。

[0003] 自日本福岛事件后,国际和国内社会对核能安全提出了更高的要求,特别针对全厂断电和完全丧失冷却链等超设计基准事故缓解措施的可靠性给予了越来越多的关注。2012年6月国家核安全局对外发布的《福岛核事故后核电厂改进行动通用技术要求(试行)》中,多次提出对在运和在建核电机组在核电厂部分或全部安全系统功能丧失的情况下,如超设计基准洪水事件条件下,应该采取更多措施以带出余热。新近发布的《“十二五”期间新建核电厂安全要求和审评原则》中,明确要求十二五期间新建核电厂须增加反应堆堆芯的余热排出、应急冷却和最终热阱的考虑,应设置多样化的最终热阱。

[0004] ACPR1000项目目前的技术方案,尽管已经针对超设计基准事故设置了一些缓解措施,但在核电厂安全系统多样化设计方面尚有较大欠缺。根据目前确定论安全分析和PSA分析结果,蒸汽发生器二次侧相关事故具有重大贡献。因此,需要针对完全丧失给水、主蒸汽管道破裂及主给水管道破裂叠加辅助给水丧失、全厂断电、完全丧失冷却链等超设计基准事故设置可靠性更高的多样化缓解系统,而二次侧非能动余热排除系统正符合该要求。本发明正是针对上述问题而设计。

### 发明内容

[0005] 本发明实施例的目的在于提供一种循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法,旨在解决对超设计基准事故设置的措施可靠性不够高,核电厂安全系统多样化存在较大欠缺的问题。

[0006] 本发明是这样实现的,一种循环回路系统的堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体设计方法,包括堆芯模拟体的设计要求、结构设计、相似比例分析和设计,以及蒸汽发生器模拟体的设计要求、结构设计和设计结果,该方法根据自然循环实验回路的设计参数和功能需求,确定实验回路系统堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体的设计要求,再分别对堆芯模拟体和蒸汽发生器模拟体进行设计和分析计算。

[0007] 进一步,堆芯模拟体的设计以ACPR1000为原型,ACPR1000堆芯有157盒燃料组件,该堆芯模拟体模拟其中的一盒燃料组件,高度比取1:4,速度比为1:2,电加热元件的表面热流密度比为2:1;

[0008] 堆芯模拟体包括铜棒、平盖、筒体端部、进出口接头、进出口法兰、筒体、吊篮、陶瓷、燃料组件模拟件、下封头、挂环、进出口反法兰;

[0009] 燃料组件模拟件通过吊篮悬挂于挂环上,平盖上装有2根铜棒,铜棒中的两根铜棒

一端分别和电源的正负极相连,另一端与燃料组件模拟件相连;

[0010] 组件模拟件和金属吊篮之间用陶瓷填充。

[0011] 进一步,堆芯模拟体堆芯模拟体管道用长度、水力学当量直径和流通截面积体现其流速、流动阻力。

[0012] 进一步,堆芯模拟体设计中的无量纲动量方程为:

$$[0013] \quad \Pi_R \Delta \rho^+ l_{hc}^+ = \sum_i \frac{l_i^+}{A_i^+} \frac{\partial u_{in}^+}{\partial \tau} + \frac{1}{2} (u_{in}^+)^2 \Pi_F + (u_{in}^+)^2 \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right)$$

[0014] 无量纲能量方程为:

$$[0015] \quad \left( \frac{\rho^+}{\rho_{in}^+} \right) \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial x}{\partial s} = \Pi_{pch} q^+ - \Pi_C \frac{\partial \theta}{\partial \tau}$$

[0016] 动量和能量方程中无量纲参数的定义分别为:Richardson数  $\Pi_{Ri} = \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_{in} u_0^2}$ , 表征

浮升力与惯性力之间的关系;阻力系数  $\Pi_{Fi} = \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_r^+}{\rho_i^+} \right) \times \left( \frac{f_l}{d_h} + K \right)_i$ , 表征回路的摩擦

和形阻;热源数也称相变数  $\Pi_H = \frac{q_0 l_{hc0} \xi}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} = \Pi_{pch}$ , 表征燃料元件释热对回路焓升的影响;

热容数  $\Pi_C = \frac{\rho c_v \Delta T_0}{\rho_0 h_{fg}}$ , 表征结构的热容量与回路焓升的关系。

[0017] 进一步,堆芯模拟体设计中的无量纲相变数为:

$$[0018] \quad \Pi_{pch} = \frac{q_0 l_{hc0} \xi}{\rho_0 u_0 A_0 \Delta h_{fg}} \left( \frac{\Delta \rho_{fg}}{\rho_g} \right)$$

[0019] 无量纲过冷度数为:

$$[0020] \quad \Pi_{sub} = \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \left( \frac{\Delta \rho_{fg}}{\rho_g} \right)。$$

[0021] 进一步,蒸汽发生器模拟体对蒸汽发生器进行模化,换热管高度比取1:4,采用原型的换热管径以及栅距,蒸汽发生器一次侧和二次侧的温度和压力都与原型一致,根据原型中蒸汽发生器的换热能力和换热面积,模化得到实验回路中蒸汽发生器的换热面积及换热管的结构尺寸;

[0022] 蒸汽发生器模拟体包括上封头、端壳体、换热管、下端壳体、下封头,换热管通过固定管板固定于下端壳体上,换热管的不同位置装有足够数量的支撑板和挡板,下封头被隔板隔开。

[0023] 进一步,堆芯模拟体采用长1050mm,外径9.5mm的不锈钢管作为加热元件,电加热元件采用定位格架固定,定位格架拟采用原型中的定位格架,电加热元件的上下端和铜板相连,铜板分别和电源的正负极相连,堆芯模拟体的进出口管道用内径为105mm的不锈钢管,位置按原型布置,电加热元件和压力容器之间用陶瓷填充。

[0024] 本发明提高了超设计基准事故设置的措施的可靠性和核电厂安全系统的多样化，具有很高的工程价值。

## 附图说明

[0025] 图1是本发明实施例提供的堆芯模拟体主视图；

[0026] 图2是本发明实施例提供的堆芯模拟体进出口管俯视图；

[0027] 图3是本发明实施例提供的堆芯模拟体管座俯视图；

[0028] 图4是本发明实施例提供的换热管布管示意图；

[0029] 图5是本发明实施例提供的换热管布管的B-B向剖视图；

[0030] 图中：1、铜棒；2、平盖；3、筒体端部；4、进出口接头；5、进出口法兰；6、筒体；7、吊篮；8、陶瓷；9、燃料组件模拟件；10、下封头；11、挂环；12、进出口反法兰；13、蒸汽出口接管；14、上封头；15、上端壳体；16、换热管；17、下端壳体；18、固定管板；19、下封头；20、隔板；21、去离子水进出口接管；22、自来水进口接管；23、去离子水进口；24、去离子水出口；25、自来水进口；26、蒸汽出口。

## 具体实施方式

[0031] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0032] 1、堆芯模拟体的设计要求

[0033] 堆芯模拟体是自然循环实验回路开展非能动余热排除实验研究的关键性设备之一。以ACPR1000为原型，ACPR1000堆芯有157盒燃料组件，本堆芯模拟体模拟其中的一盒燃料组件。高度比取1:4，速度比为1:2，电加热元件的表面热流密度比为2:1，并合理设计轴向和横向阻力特性。

[0034] 2、堆芯模拟体结构设计

[0035] 堆芯模拟体结构总图如图1-图3所示。堆芯模拟体包括铜棒1、平盖2、筒体端部3、进出口接头4、进出口法兰5、筒体6、吊篮7、陶瓷8、燃料组件模拟件9、下封头10、挂环11、进出口反法兰12。

[0036] 所述燃料组件模拟件9采用长1050mm(燃料组件高度的1/4)，外径9.5mm(燃料组件的外径)的不锈钢管作为加热元件。为模拟燃料组件的定位格架，电加热元件也采用定位格架固定，其定位格架拟采用原型中的定位格架。燃料组件模拟件9通过吊篮7悬挂于挂环11上，实现固定。平盖2上装有2根铜棒1，铜棒1中的两根铜棒一端分别和电源的正负极相连，另一端与燃料组件模拟件9相连，实现电加热的目的。

[0037] 为减小金属热容，组件模拟件9和金属吊篮7之间用陶瓷8填充。进出口接头4采用内径为105mm的不锈钢管(约原型尺寸的1/7)，且位置按原型布置。

[0038] 3、堆芯模拟体相似比例分析

[0039] 反应堆一回路系统结构复杂，不论是堆芯还是蒸汽发生器，都需要通过一定的假设进行简化。反应堆一回路系统的设备可以简单的分为两种类型，即有热量传递和无热量传递；三种设备：管路、蒸汽发生器、堆芯。其中，此处的蒸汽发生器是指发生了进出口温度

或密度变化的那部分,即蒸汽发生器管束。而反应堆堆芯则是发生了温度或密度变化的那部分堆芯,即加热部分,其余部分则视为管道。如果考虑到两相流型的影响,严格的说管道内流体的密度也可以发生变化。管道的特征是没有热量传递,只是流体的位置发生变化,并贡献阻力。反应堆管束中,如冷管和热管,在符合一维假设方面没有什么大的问题,而一些局部有突变的构件可以通过阻力作用来体现其在自然循环过程中的作用。因此,管道可以用长度、水力学当量直径和流通截面积体现其流速、流动阻力;通过在重力方向的投影体现其位置变化对重力作用的贡献。不论是几根管道,均可以一维化为上述特征的元件。

### [0040] 3.1基本方程

[0041] 首先是一维假设,认为流动沿着设备或管道的轴向方向进行,而传热则在一维边界的径向进行;其次,可以通过采用特征参数,如热工水力直径等方法,对径向影响的作用进行评估并进行模拟;此外,还需要忽略热损失、轴向传热及方程中的高阶项,其控制方程为:

#### [0042] (1) 连续性方程

$$[0043] \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

[0044] 上式中 $\rho$ 为流体密度, $u$ 为流体流速。

#### [0045] (2) 动量方程

$$[0046] \quad -\frac{\partial P}{\partial s} = \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^2}{\partial s} + \rho g - \frac{f}{De} \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (2)$$

[0047] 上式中 $P$ 为压力, $f$ 为阻力系数, $De$ 为水力学当量直径。

#### [0048] (3) 能量方程

$$[0049] \quad \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h}{\partial s} = \frac{\zeta}{A} h(T_w - T_f) \quad (3)$$

[0050] 上式中 $h$ 为流体的焓, $\zeta$ 为周长, $A$ 为截面积, $T_w$ 和 $T_f$ 分别为壁面温度和流体温度。

#### [0051] (4) 传热方程

$$[0052] \quad \frac{\partial \rho c T}{\partial t} + \frac{\xi}{A} h(T_w - T_f) = \left( \frac{\xi}{A} \right) q_s \quad (4)$$

[0053] 本发明对流换热系数不进行模拟,主要原因有:①金属构件结构复杂,本模型中的一维方法模拟不能准确描述;②两相传热温差很小,测量到的壁温不具有很大的价值;③燃料元件基本上是定热流密度传热,不受传热系数的影响,而燃料棒本身的壁温与材料、结构等有关,不必详细模拟,对其研究可以在其他情况下进行。这样,对基本方程中的能量方程和传热方程进行合并,其新的能量方程为:

$$[0054] \quad \frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u h}{\partial s} = \left( \frac{\xi}{A} \right) q_s - \frac{\partial \rho c T}{\partial t} \quad (5)$$

[0055] 将能量方程用质量含汽量 $x = \frac{h - h_f}{h_{fg}}$ 表示

$$[0056] \quad \rho h_{ig} \frac{\partial x}{\partial t} + \rho u h_{ig} \frac{\partial x}{\partial s} = \left( \frac{\xi}{A} \right) q_s - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

[0057] 3.2方程无量纲化

[0058] 由能量方程 (6) 可知,回路流体的密度,主要受边界传热的控制。当堆芯传热有变化时,此时局部的密度发生变化,但该密度变化并不会立即对流速产生很大影响。只有该密度变化因流体流动传递到整个回路从而实质性的影响回路中的密度差,从而导致流速变化。因此,可以认为回路流体密度对于时间的偏微分项  $\partial \rho / \partial t$  是一个可以忽略的项。因此,连续性方程变化为:

$$[0059] \quad \rho u A = \rho_{in} u_{in} A_{in} = \text{const} \quad (7)$$

[0060] 上式中  $\rho_{in}$ 、 $u_{in}$  和  $A_{in}$  分别为堆芯入口处的密度、流速和流通截面积。

[0061] 将守恒方程无量纲化,其无量纲参数分别为:速度  $u^+ = \frac{u}{u_0}$ ; 长度  $l^+ = \frac{l}{l_{hc0}}$ ; 密度

$\rho^+ = \frac{\rho}{\rho_0}$ ; 密度差  $\Delta \rho^+ = \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho_0}$ ; 流通面积  $A^+ = \frac{A}{A_0}$ ; 时间  $\tau = \frac{t u_0}{l_{hc0}}$ , 温度  $\theta = \frac{T - T_0}{\Delta T_0}$  等,其角标0代表参数的初始值。

[0062] 连续方程无量纲化:

$$[0063] \quad \frac{\rho u A}{\rho_0 u_0 A_0} = \frac{\rho_{in} u_{in} A_{in}}{\rho_0 u_0 A_0} \quad (8)$$

$$[0064] \quad \text{即无量纲速度为 } u^+ = \left( \frac{A_{in}^+}{A^+} \right) \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho^+} \right) u_{in}^+ \quad (9)$$

[0065] 动量方程无量纲化:

[0066] (1) 重力压降项  $\Delta \rho g l_{hc}$

$$[0067] \quad \frac{\Delta \rho g l_{hc}}{\rho_{in} u_0^2} = \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_{in} u_0^2} \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho_0} \frac{l_{hc}}{l_{hc0}} = \Pi_R \Delta \rho^+ l_{hc}^+ \quad (10)$$

$$[0068] \quad (2) \text{ 惯性项 } \sum_i \frac{\partial \rho u}{\partial t} l_i = \sum_i \frac{A_{in}}{A} \frac{\partial \rho_{in} u_{in}}{\partial t} l_i = \sum_i \frac{A_{in}}{A_i} \rho_{in} \frac{\partial u_{in}}{\partial t} l_i$$

$$[0069] \quad \text{由 } \tau = \frac{t u_0}{l_{hc0}} \text{ 可得 } t = \frac{\tau l_{hc0}}{u_0}$$

$$[0070] \quad \frac{\sum_i \frac{\partial \rho u}{\partial t} l_i}{\rho_{in} u_0^2} = \frac{\sum_i \frac{A_{in}}{A_i} \rho_{in} \frac{\partial u_{in}}{\partial t} l_i}{\rho_{in} u_0^2} = \frac{\sum_i \frac{A_{in}}{A_i} \rho_{in} \frac{\partial u_{in}}{\partial \left( \frac{\tau l_{hc0}}{u_0} \right)} l_i}{\rho_{in} u_0^2} \quad (11)$$

$$= \sum_i \frac{A_{in}}{A_i} \frac{\partial u_{in}^+}{\partial \tau} l_i^+ = \sum_i \frac{l_i^+}{A_i^+} \frac{\partial u_{in}^+}{\partial \tau}$$

$$[0071] \quad (3) \text{ 摩擦项 } \sum_i \left( \frac{f}{De} l_i + K_i \right) \frac{1}{2} \rho u^2$$



$$\begin{aligned}
[0072] \quad & \frac{\sum_i \left( \frac{f}{De} l_i + K_i \right) \frac{1}{2} \rho u^2}{\rho_{in} u_0^2} = \frac{1}{2} \frac{\sum_i \left( \frac{f}{De} l_i + K_i \right) \frac{A_{in}^2 \rho_{in}^2 u_{in}^2}{A_i^2 \rho}}{\rho_{in} u_0^2} \quad (12) \\
& = \frac{1}{2} (u_{in}^+)^2 \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right) \left( \frac{f}{De} l_i + K_i \right) = \frac{1}{2} (u_{in}^+)^2 \Pi_F
\end{aligned}$$

$$[0073] \quad (4) \text{ 迁移项 } \sum_i \frac{\partial \rho u^2}{\partial s} l_i$$

$$[0074] \quad \frac{\sum_i \rho_i u_i^2}{\rho_{in} u_0^2} = \frac{\sum_i \frac{A_{in}^2 \rho_{in}^2 u_{in}^2}{A_i^2 \rho_i}}{\rho_{in} u_0^2} = (u_{in}^+)^2 \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right) \quad (13)$$

[0075] 无量纲化后的动量方程为

$$[0076] \quad \Pi_R \Delta \rho^+ l_{hc}^+ = \sum_i \frac{l_i^+}{A_i^+} \frac{\partial u_{in}^+}{\partial \tau} + \frac{1}{2} (u_{in}^+)^2 \Pi_F + (u_{in}^+)^2 \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right) \quad (14)$$

[0077] 无量纲化后的能量方程为(推导方法与动量方程类似)

$$[0078] \quad \left( \frac{\rho^+}{\rho_{in}^+} \right) \frac{\partial x}{\partial \tau} + \frac{\partial x}{\partial s} = \Pi_{pch} q^+ - \Pi_C \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (15)$$

[0079] 动量和能量方程中无量纲参数的定义分别为:Richardson数  $\Pi_{Ri} = \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_{in} u_0^2}$ , 表征

浮升力与惯性力之间的关系;阻力系数  $\Pi_{Fi} = \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right) \times \left( \frac{fl}{d_h} + K \right)_i$ , 表征回路的摩擦

和形阻;热源数也称相变数  $\Pi_H = \frac{q_0 l_{hc0} \xi}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} = \Pi_{pch}$ , 表征燃料元件释热对回路焓升的影响;

热容数  $\Pi_C = \frac{\rho c_v \Delta T_0}{\rho_0 h_{fg}}$ , 表征结构的热容量与回路焓升的关系。

[0080] 3.3相似准则

[0081] 首先确定高度比相似

$$[0082] \quad (l_{hc}^+)_R = 1 \quad (16)$$

[0083] 为满足原型和模型之间相似, (14) 和 (15) 式的模型和原型的比值均等于1, 所以有

$$[0084] \quad \left( \Pi_R = \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_{in} u_0^2} \right)_R = 1 \quad (17)$$

$$[0085] \quad \left( \Pi_F = \sum_i \left( \frac{A_{in}}{A_i} \right)^2 \left( \frac{\rho_{in}^+}{\rho_i^+} \right) \left( \frac{f}{De} l_i + K_i \right) \right)_R = 1 \quad (18)$$

$$[0086] \quad \left( \Pi_H = \frac{q_0 l_{hc0} \xi}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} = \Pi_{pch} \right)_R = 1 \quad (19)$$

$$[0087] \quad \left( \Pi_C = \frac{\rho c_v \Delta T_0}{\rho_0 h_{fg}} \right)_R = 1 \quad (20)$$

[0088] 为满足连续方程相似,有

$$[0089] \quad \left( \frac{A_m^+}{A^+} \right)_R \left( \frac{\rho_m^+}{\rho^+} \right)_R = 1 \quad (21)$$

[0090] 对于流动阻力,主要是因为气液两相流动模拟特性的需要,采用原型相同的棒束排列结构较为适宜。在相同介质(水-水模拟)且等压模拟中,首先,原型和模型的流通面积相似,即

$$[0091] \quad A_R = \frac{(A/A_0)_m}{(A/A_0)_p} = 1 \quad (22)$$

$$[0092] \quad \text{由} \left( \frac{A_m^+}{A^+} \right)_R \left( \frac{\rho_m^+}{\rho^+} \right)_R = 1 \text{ 及 } A_R = \frac{(A/A_0)_m}{(A/A_0)_p} = 1 \text{ 可得 } \left( \frac{\rho_m^+}{\rho_i^+} \right)_R = 1 \quad (23)$$

[0093] 根据式(23)有

$$[0094] \quad \left( \frac{\rho_m^+}{\rho_i^+} \right)_R = 1 \quad (24)$$

[0095] 即  $\left( \frac{\rho_m}{\rho_0} \right)_R = 1$ , 这个准则数表征原型和模型的压力比为定值:

$$[0096] \quad \frac{P_m}{P_p} \equiv \text{Constan} t \quad (25)$$

[0097] 根据上式可以得到堆芯进出口密度存在以下关系

$$[0098] \quad \left( \frac{\Delta \rho_0}{\rho_0} \right)_R = 1 \quad (26)$$

[0099] 根据式(17)、式(24)和式(26)可以得到

$$[0100] \quad (\Pi_R)_R = \left( \frac{\Delta \rho_0 g l_{hc0}}{\rho_m u_0^2} \right)_R = \left( \frac{\Delta \rho_0 g}{\rho_m} \right)_R \left( \frac{l_{hc0}}{u_0^2} \right)_R = \left( \frac{l_{hc0}}{u_0^2} \right)_R = 1 \quad (27)$$

[0101] 上式表达的是相同物性下高度比和自然循环速度比的关系。

[0102]  $(\Pi_{Fi})_R$  据式(21)可以简化为:

$$[0103] \quad (\Pi_{Fi})_R = \left[ \sum_i \left( \frac{A_m}{A_i} \right) \left( \frac{f l}{D_e} + K \right) \right]_{i=R} = 1 \quad (28)$$

[0104] 由于模型和原型的压力比为定值,所以 $\left(\frac{\Delta\rho_{fg}}{\rho_g}\right)_R=1$ 成立。

[0105] 同样,可以将 $[(\Pi_H)_i]_R$ 写成:

$$[(\Pi_H)_i]_R = \left[ \frac{q_0 l_{hc0} \xi_i}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} \right]_R = \left[ \frac{q_0 l_{hc0} \xi_i}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} \left( \frac{\Delta\rho_{fg}}{\rho_g} \right) \right]_R \quad (29)$$

[0107] 该式就是无量纲相变数 $\Pi_{pch} = \frac{q_0 l_{hc0} \xi_i}{\rho_0 u_0 A_0 h_{fg}} \left( \frac{\Delta\rho_{fg}}{\rho_g} \right)$ ,同理,由入口含气量的定义可

$$\text{以推导出无量纲过冷度数 } \Pi_{sub} = \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \left( \frac{\Delta\rho_{fg}}{\rho_g} \right)$$

[0108] 从能量方程得知,堆芯内的质量含气量变化相同,如果保证堆芯出口的含气量相等 $(X_e)_R=1$ ,则 $(X_{in})_R=1$ ,有

$$[(\Pi_{sub})_i]_R=1 \quad (30)$$

[0110] 对于热容数有:

$$[(\Pi_c)_i]_R = \left[ \left( \frac{\rho c_v \Delta T_0 A}{\rho_0 A_i h_{fg}} \right) \right]_R = \left[ \left( \frac{\rho c_v \Delta T_0}{\rho_0 \Delta h_{fg}} \right) \right]_R \left[ \left( \frac{A_0}{A_i} \right) \right]_R \quad (31)$$

[0112] 上式在流体和金属材料的热物性相同时,有:

$$[(\Pi_c)_i]_R = \left[ \left( \frac{A_0}{A_i} \right) \right]_R = 1 \quad (32)$$

[0114] 该式表示在每一局部区域,金属构件与回路流体之间的质量关系。

[0115] 综上所述,等压水-水模拟准则关系如表1所示:

[0116] 表1 等压水-水模拟准则数

[0117]

| 序号 | 准则                                                                                                              | 原型              | 模型              | 注释                                                      |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------|
| 1  | $(l_{hc0})_R = H$                                                                                               | 4.2m            | 1.05m           | 根据模拟装置的规模决定,主要决定于电源及三维现象的模拟需要,压力容器的尺度等。                 |
| 2  | $(A_0)_R = C$                                                                                                   | $\phi$<br>760mm | $\phi$<br>105mm |                                                         |
| 3  | $(P_0)_R = 1$                                                                                                   | 15.5MPa         | 15.5MPa         | 等压模拟,由模拟准则要求。                                           |
| 4  | $\left(\frac{l_{hc0}}{u_0^2}\right)_R = 1$                                                                      | 15m/s           | 7.5 m/s         | 速度决定于高度                                                 |
| 5  | $(\Pi_{Ti})_R = \left[ \sum_i \left( \frac{A_{0i}}{A_i} \right) \left( \frac{f}{D_e} + K \right) \right]_R = 1$ |                 |                 | 该准则的满足需要考虑适当调整节流系数K的作用,可在实际中灵活掌握。                       |
| 6  | $\left[ \sum_i \left( \frac{L_i}{A_i} \right) \right]_R = 1$                                                    |                 |                 | 对瞬态特性有影响                                                |
| 7  | $A_{iR} = \frac{(a_i/a_0)_m}{(a_i/a_0)_p} = (a_i)_R = 1$                                                        | $\phi$<br>760mm | $\phi$<br>105mm | 各部件的流通面积                                                |
| 8  | $[(\Pi_c)_i]_R = \left( \frac{a_s}{a_i} \right)_R = 1$                                                          |                 |                 | 和流体之间有热量传递的金属部件的质量,应该注意沿一维方向分布相似。序号6、7、8、9需要综合考虑。       |
| 9  | $(\Pi_{pck})_R = [(q_0 \xi)_i]_R \left( \frac{\sqrt{l_h^0}}{a_i} \right)_R = 1$                                 |                 |                 | 决定燃料元件的表面热流密度和面积的比值。该式意味着一维方向的功率分布曲线是相同的。同时从该式可以推导总功率比。 |

[0118] 3.4堆芯模拟体

[0119] 本实验拟模拟一盒燃料组件,且原型中有157盒燃料组件,原型中堆芯入口流通截

面积为  $A_0 = \frac{1}{4} \pi D^2 \times 3$ , 由 (22) 式可得

$$[0120] \quad \left( \frac{1}{A_0 = \frac{1}{4} \pi D^2} \right)_m = \left( \frac{157}{A_0 = \frac{1}{4} \pi 760^2 \times 3} \right)_p \quad (32)$$

[0121] 即模型中堆芯入口管径约为105mm。本实验中,直径比取1:7.23,面积比1:52,高度比取1:4,即速度比为1:2,电加热元件的表面热流密度比为2:1。堆芯模拟体的设计结果为:

[0122] a) 堆芯高度1:4设计;

[0123] b) 流通面积按照1:52设计,堆芯流速比为1:2;

[0124] c) 采用直接加热方式,棒的表面热流密度比为2:1;

[0125] d) 采用原型的棒直径,以及栅距;

[0126] e) 合理设计轴向和横向阻力特性(模拟定位格架);

[0127] f) 适当模拟横向流动特性。

[0128] 4、蒸汽发生器设计要求

[0129] 与堆芯模拟体类似,对蒸汽发生器进行模化,换热管高度比取1:4,采用原型的换热管径以及栅距。由模化可知,蒸汽发生器的热工参数尽应和原型保持一致,即蒸汽发生器一次侧和二次侧的温度和压力都应和原型一致。根据原型中蒸汽发生器的换热能力和换热面积,模化就可得到实验回路中蒸汽发生器的换热面积及换热管的结构尺寸。

[0130] 5、蒸汽发生器结构设计

[0131] 如图4和5所示为蒸汽发生器结构设计图。蒸汽发生器包括上封头14、端壳体15、换热管16、下端壳体17、下封头19。去离子水由去离子水进出口23进入换热管16后与冷凝体换热,并由去离子水出口24流出,所述换热管16通过固定管板18固定于下端壳体17上,换热管16的不同位置应装有足够数量的支撑板和挡板,下封头19被隔板20隔开。冷流体自来水由自来水进口25流入,流入后沉积在下端壳体17的空腔内与换热管16内的热流体发生热交换后气化为蒸汽,并由蒸汽出口26排出进行循环。

[0132] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

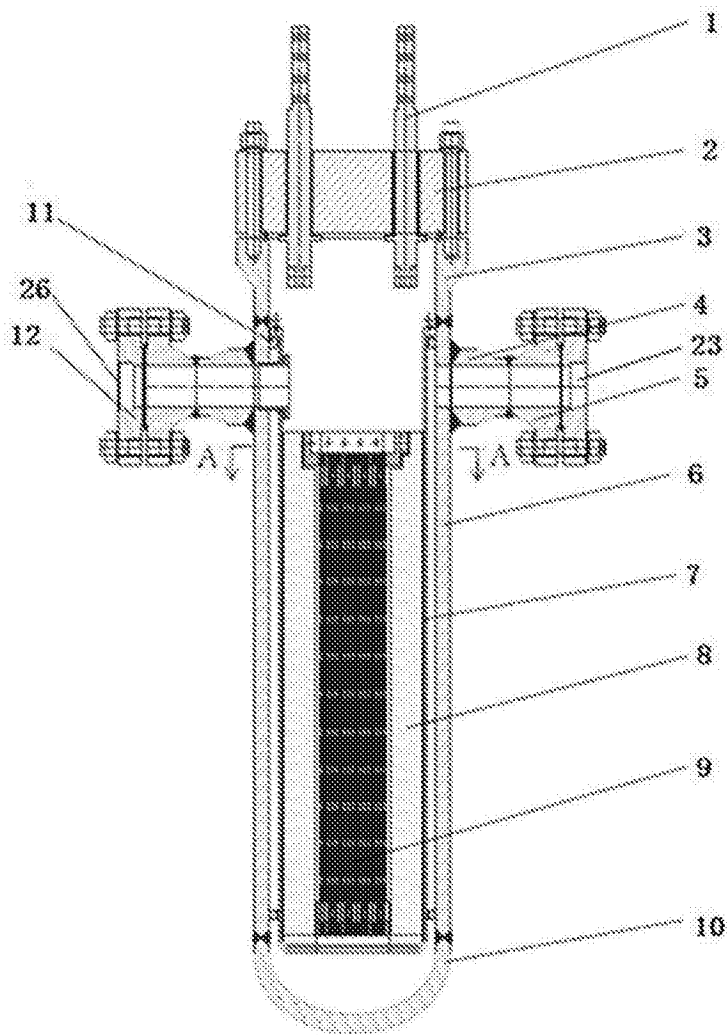


图1

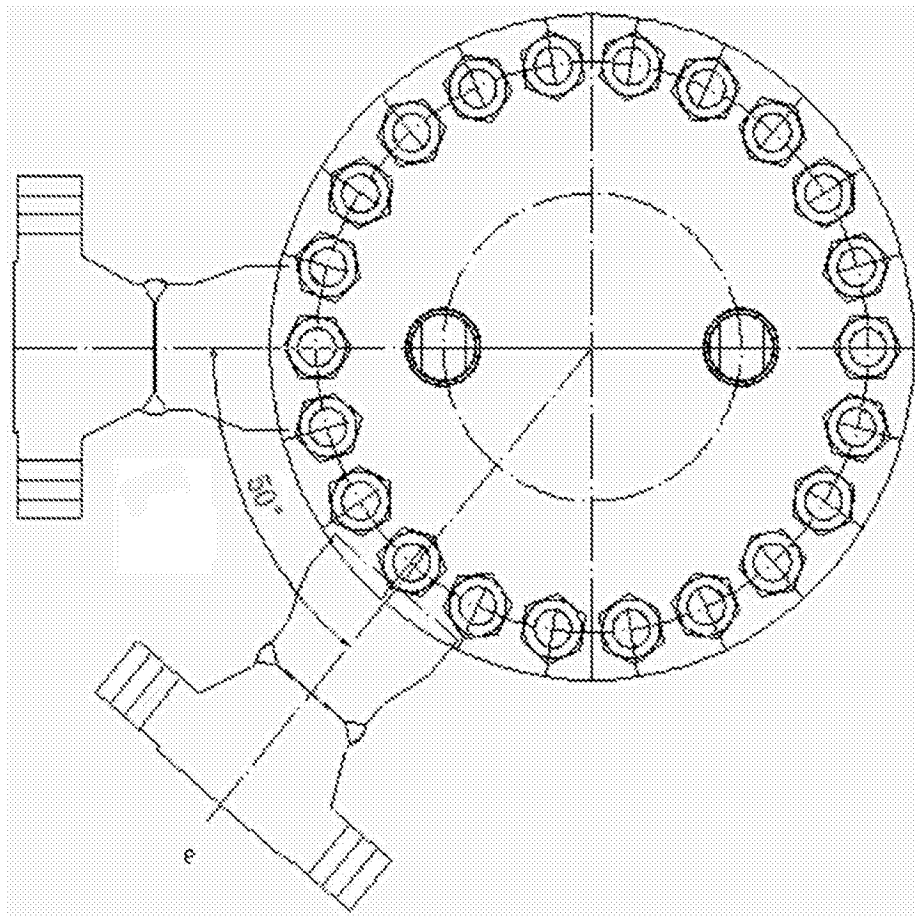


图2

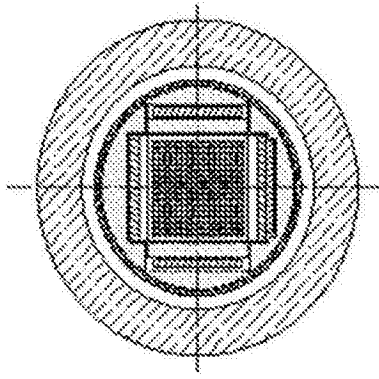


图3

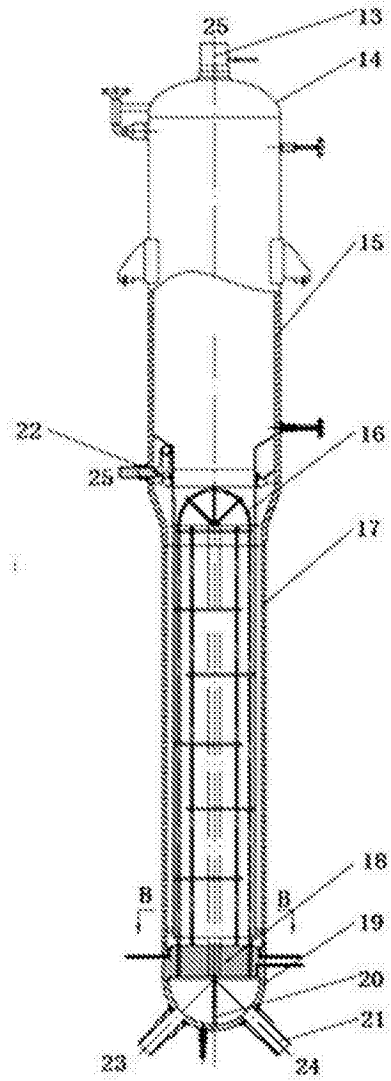


图4



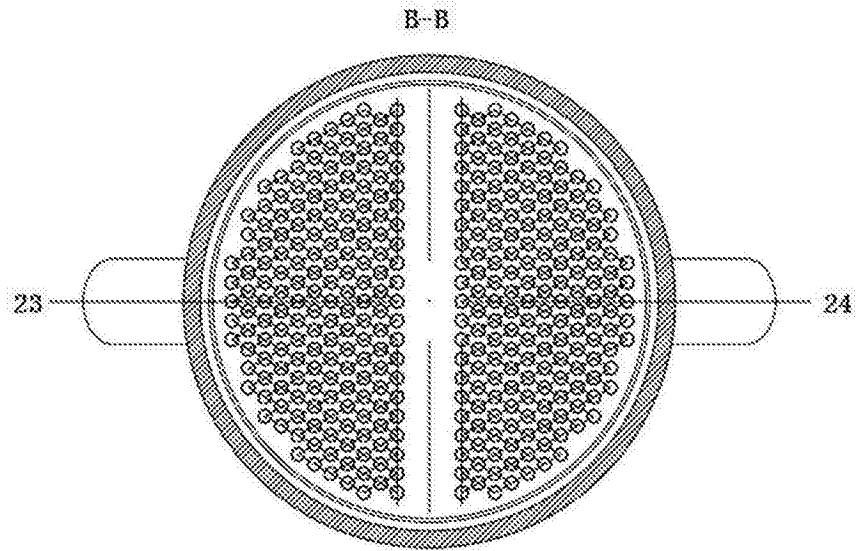


图5