

# 10 MW 高温堆热气联箱 气流混合模拟的相似律\*

黄志勇 马昌文 姚梅生 徐元辉

(清华大学核能技术设计研究院, 北京, 102201)

10 MW 高温气冷实验堆堆芯出口需设置热气联箱, 以使氦气得到充分的热混合。使用两流体方程无量纲化分析方法导出相似准则, 得到了热气联箱在缩小模型比例的系统上以常压小温差空气代替高压大温差氦气进行热工水力学模拟试验研究时应遵循的模拟准则, 即几何准则、流动准则和传热准则。分析了各准则在热流体混合过程中的作用及相对重要性, 确定出雷诺数  $Re$ 、普朗特数  $Pr$ 、热冷气体流量比  $q_{v,h}/q_{v,c}$  及几何结构参数  $\Psi$  是影响热气联箱混合性能的主要因素, 并进行了试验验证。试验结果为高温堆工程设计提供了结构和热工参数。

关键词 高温堆 热工水力学 气体混合 相似律

中图法分类号 TL 424 TL 33

## 1 物理过程及模拟装置

10 MW 高温气冷实验堆采用圆柱形球床堆芯, 用氦气作载热剂和冷却剂, 其出口平均温度达 700 (二期工程达 950)。稳态热工水力分析表明: 堆芯出口氦气径向温度分布很不均匀, 这可能造成蒸汽发生器部件局部过热。为了确保蒸汽发生器的运行安全, 进入蒸汽发生器的氦气在流道截面上的温度偏差应小于设计规范中的允许值。为此, 在堆底反射层结构中的孔形流道下面设置了热气联箱, 以使堆芯出口氦气在联箱中得到充分的热量、质量混合。

热气联箱与堆芯下反射层联通, 流体靠压力驱动, 无动力部件, 依靠特殊结构实现流体混合。为了研究堆底热气联箱的流体热混合性能, 建立相似试验模型(图 1)和试验系统<sup>[1]</sup>(图 2)。在高温堆热气联箱模拟试验研究系统中, 模型倒立安置, 热气联箱右侧为热气导管, 下面为堆芯底反射层。冷热气体通过流量调节阀、风机、流量计、电加热器后进入堆芯的底反射层, 温度不均匀的气体在热气联箱中混合后流入热气导管。试验使用空气介质, 用热电偶测量温度场。

## 2 数学模型和相似准则

对于混合器(热气联箱)内复杂的流体混合过程, 通过从通用的流体控制方程出发予以解决<sup>[2~4]</sup>。

\* 国家“863”高技术项目

黄志勇: 男, 31岁, 反应堆热工水力专业, 副研究员, 博士

收稿日期: 1997-12-19 收到修改稿日期: 1998-03-02

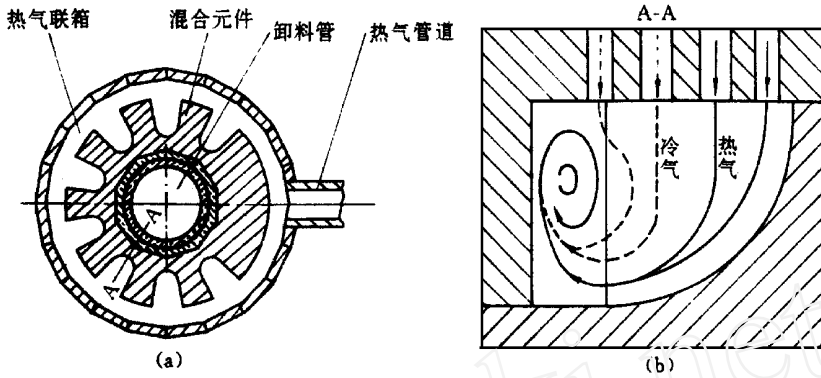


图1 热气联箱模型(a)及气体流动示意图(b)

Fig 1 Model of hot gas plenum (a) and diagrammatic drawing of gas flow (b)

设定如下假设条件: 流体为连续介质, 且为均质不可压缩的各向同性牛顿流体, 遵循 Navier-Stokes 方程; 流动中每一瞬时流体质点处于准热平衡态; 流体中的热传导遵循 Fourier 定律, 动力粘性系数  $\mu$  随温度  $T$  的变化很小; 绝热边界。

把热气、冷气作为 2 种流体来考虑, 气体流动是分离的, 具有不同的速度、温度参数。描述两流体流动传热现象的完整方程中应包括每 1 种流体的连续性方程、运动方程、能量方程。为进行相似分析, 选用简单模型, 认为在运动方程和能量方程中 2 种流体只有速度、温度参数各不相同。设定符号上标为记号“ ”的代表冷气流, 符号上标为记号“ ”的代表热气流。

两流体运动方程 (仅列出  $x$  方向) 可表示为:

$$\frac{\partial(u + u)}{\partial t} + (u \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial x}) + (v \frac{\partial u}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y}) + (w \frac{\partial u}{\partial z} + w \frac{\partial u}{\partial z}) = (\beta_g \rho \Delta T + \beta_g \rho \Delta T) - \frac{1}{\rho} (\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x}) + \frac{\mu}{\rho} (\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) \quad (1)$$

两流体能量方程为:

$$\frac{\partial T + T}{\partial t} + (u \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial x}) + (v \frac{\partial T}{\partial y} + v \frac{\partial T}{\partial y}) + (w \frac{\partial T}{\partial z} + w \frac{\partial T}{\partial z}) = (\frac{k}{\rho c_p}) (\frac{\partial^2 (T + T)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (T + T)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (T + T)}{\partial z^2}) + \frac{\mu}{\rho c_p} \phi \quad (2)$$

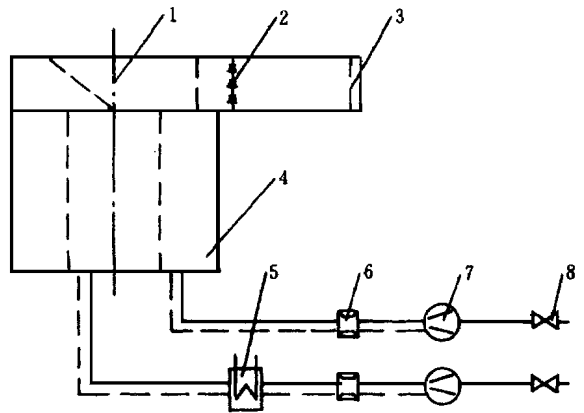


图2 热气联箱混合性能模拟试验系统

Fig 2 Simulative test system of mixing performance of hot gas plenum

- 1——热气联箱模型; 2——热电偶; 3——热气导管;
- 4——堆芯底反射层; 5——电加热器; 6——流量计;
- 7——风机; 8——调节阀

$$\phi = 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] + \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2$$

式中:  $\phi$ 为粘性耗散热, 它表示由流体粘性产生内摩擦使部分机械能转变为热能。

作无量纲化处理。取特征时间  $t_0$ 、特征长度  $L$ 、特征压差  $\Delta p_0$ , 对两流体分别取特征速度  $u_0$  和  $u_0$ 、特征温差  $\Delta T_0$  和  $\Delta T_0$ , 无量纲单纯量分别为:

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad Z = \frac{z}{L}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad V = \frac{v}{u_0}, \quad W = \frac{w}{u_0}, \quad U = \frac{u}{u_0}, \quad V = \frac{v}{u_0},$$

$$W = \frac{w}{u_0}, \quad t^* = \frac{t}{t_0}, \quad p^* = \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \quad p^* = \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{\Delta T_0}, \quad T^* = \frac{T - T_0}{\Delta T_0}$$

则无量纲化动量方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t^*} \left( \frac{L}{u_0 t_0} U + \frac{u_0^2}{u_0^2} \cdot \frac{L}{u_0 t_0} U \right) + (U \frac{\partial U}{\partial X} + \frac{u_0^2}{u_0^2} U \frac{\partial U}{\partial X}) + (V \frac{\partial U}{\partial Y} + \frac{u_0^2}{u_0^2} V \frac{\partial U}{\partial Y}) + \\ & (W \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{u_0^2}{u_0^2} W \frac{\partial U}{\partial Z}) = \left( \frac{L}{u_0^2} \beta g \rho \Delta T^* + \frac{L}{u_0^2} \beta g \rho \Delta T^* \right) - \left( \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \frac{\partial p}{\partial X} + \frac{\Delta p_0}{\rho u_0^2} \cdot \frac{u_0^2}{u_0^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial X} \right) + \\ & \frac{\mu}{\rho u_0 L} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) + \frac{\mu}{\rho u_0 L} \cdot \frac{u_0^2}{u_0^2} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

无量纲化能量方程为:

$$\begin{aligned} & \frac{L}{u_0 t_0} \cdot \frac{\partial}{\partial t^*} (T^* + \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} T^*) + (U \frac{\partial T^*}{\partial X} + \frac{u_0}{u_0} \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} U \frac{\partial T^*}{\partial X}) + (V \frac{\partial T^*}{\partial Y} + \\ & \frac{u_0}{u_0} \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} V \frac{\partial T^*}{\partial Y}) + (W \frac{\partial T^*}{\partial Z} + \frac{u_0}{u_0} \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} W \frac{\partial T^*}{\partial Z}) = \frac{k}{\rho c_p L u_0} \left[ \frac{\partial^2}{\partial X^2} (T^* + \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} T^*) + \right. \\ & \left. \frac{\partial^2}{\partial Y^2} (T^* + \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} T^*) + \frac{\partial^2}{\partial Z^2} (T^* + \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} T^*) \right] + \frac{\mu u_0}{\rho c_p L \Delta T_0} \phi \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3)、(4)得到两流体热工相似准则如下:

- 1) 斯特劳哈尔数  $St = \frac{L}{u_0 t_0}; St = \frac{L}{u_0 t_0}$
- 2) 格拉晓夫数  $\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\beta g \rho L^3 \Delta T_0}{v^2} \cdot \frac{v^2}{u^2 L^2} = \frac{\beta g \rho L \Delta T_0}{u^2};$   
 $\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\beta g \rho L^3 \Delta T_0}{v^2} \cdot \frac{v^2}{u^2 L^2} = \frac{\beta g \rho L \Delta T_0}{u^2}$
- 3) 欧拉数  $Eu = \frac{\Delta p}{\rho u_0^2}; Eu = \frac{\Delta p}{\rho u_0^2}$
- 4) 雷诺数  $Re = \frac{\rho u_0 L}{\mu}; Re = \frac{\rho u_0 L}{\mu}$
- 5) 贝克来数  $Pe = \frac{\rho c_p L u_0}{k} = \frac{\rho L u_0}{\mu} \cdot \frac{\mu c_p}{k} = Re \cdot Pr;$   
 $Pe = \frac{\rho c_p L u_0}{k} = \frac{\rho L u_0}{\mu} \cdot \frac{\mu c_p}{k} = Re \cdot Pr$
- 6) 埃克特数  $\frac{Ec}{Re} = \frac{u_0^2}{c_p \Delta T_0} \cdot \frac{\mu}{\rho u_0 L} = \frac{\mu u_0}{\rho c_p L \Delta T_0};$

$$\frac{Ec}{Re} = \frac{u_0^2}{c_p \Delta T_0} \cdot \frac{\mu}{\rho u_0 L} = \frac{\mu u_0}{\rho c_p L \Delta T_0}$$

7) 马赫数  $Ma = \frac{u}{a} = \frac{u}{\sqrt{\gamma p / \rho}} = \frac{u}{\sqrt{\gamma R T}}$ ;

$$Ma = \frac{u}{a} = \frac{u}{\sqrt{\gamma p / \rho}} = \frac{u}{\sqrt{\gamma R T}}$$

8) 流速比  $\frac{u_0}{u_0}$

9) 温差比  $\frac{\Delta T_0}{\Delta T_0}$

综上所述, 描写两流体的热工相似准则为:

$$Sr = \frac{L}{ut}; Gr = \frac{\beta g \rho \Delta T}{u^2}; Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2}; Re = \frac{\rho u L}{\mu}; Pr = \frac{\mu c_p}{k}; Ec = \frac{u^2}{c_p \Delta T}; Ma = \frac{u}{a}; \frac{u_0}{u_0}; \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0} \quad (5)$$

式中:  $Sr, Gr, Re, Pr, Ec, Ma, \frac{u_0}{u_0}, \frac{\Delta T_0}{\Delta T_0}$  为定型准则,  $Eu$  为非定型准则; 无量纲流速  $U, U, V, V, W, W$  和无量纲温度  $T^*$  都是被决定量。

热气联箱模型试验是稳态过程, 速度场和温度场的边界条件如下:

在联箱冷气入口处, 流动已充分发展, 仅有垂直方向的平均流动, 即

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = f_c(x, y), \quad T = g_c(x, y)$$

在联箱热气入口处, 流动也已充分发展, 仅有垂直方向的平均流动, 即

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = f_h(x, y), \quad T = g_h(x, y)$$

联箱出口处, 仅有水平方向的平均流动, 即

$$u = f_e(y, z), \quad v = 0, \quad w = 0, \quad T = g_e(y, z)$$

在混合室内壁、内管壁、混合元件表面为无滑移、绝热条件(因试验本体外覆绝热层, 且流体温度较低), 即

$$u = 0, \quad v = 0, \quad w = 0, \quad \partial T / \partial n = 0$$

式中:  $f_c, g_c, f_h, g_h, f_e, g_e$  为函数, 坐标  $x, y, z$  为自变量, 边界条件为数值或坐标的函数。

显函数形式的无量纲温度准则方程为:

$$T^* = f(X, Y, Z, Sr, Gr, Re, Pr, Ec, Ma, \frac{u_0}{u_0}, \frac{T_0}{T_0}) \quad (6)$$

无量纲温度  $T^*$  是非定型准则, 可根据式(6)进行模型试验得出。应用  $T^*$  无量纲温差比的物理意义, 定义最大温差混合度 TMD (Temperature Mixing Degree) 来描述热气、冷气流体的温度混合效果:

$$TMD = 1 - \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{in}} \quad (7)$$

式中:  $\Delta T_{max}$  为联箱出口流体温度最高点与最低点之差;  $\Delta T_{in}$  为进口冷热流体温差; TMD 的数值范围为 0~ 1。

这样, 准则方程可表示为:

$$TMD = f(Sr, Gr, Re, Pr, Ec, Ma, u_0/u_0, \Psi) \quad (8)$$

其中:  $\Psi$  为混合元件的几何形状因子。

### 3 相似准则选用

如果考虑的流动中存在周期性运动,则斯特劳哈尔数 $St$ 对保证相似性有重要作用。对于热气联箱内的稳态流动混合, $St$ 将不起作用。

在受迫对流混合过程中,当 $Gr/Re^2 < 0.1$ 时,就需要考虑自然对流的作用。对最有可能发生自然对流的情况,即联箱内不设混合元件而为空心结构时,在热气联箱额定工况下,算得 $Gr/Re^2 = 0.05 < 0.1$ 。对此,可不考虑自然对流的影响,即 $Gr$ 不起作用。

雷诺数 $Re$ 反映流体的流动状态,是惯性力与粘性力之比的度量。在几何相似的前提下,确保模型与原型各处具有相同的 $Re$ 、 $Re$ ,二者内部的流动则相似。由于热气联箱内部的流道几何形状比较复杂,各处流体的温度、压力、质量流量等参数不尽相同,在模型和原型中均取热气导管中的雷诺数 $Re$ 作参考量,以热气导管内径为特征长度。在几何相似的前提下,只选取 $Re$ ,而不选取 $Re$ 、 $Re$ ,对相似程度的影响不大。

普朗特数 $Pr$ 的物理意义是流体动量扩散与热量扩散之比的度量,即流体的速度场与温度场相似程度的度量。 $Pr$ 包含了流体的重要物性,又称物性准则,每种气体的 $Pr$ 数值随温度、压力变化不大,即 $Pr$ 、 $Pr$ 相近。在混合试验中,选用 $0.1\text{MPa}$ 、 $50^\circ\text{C}$ 的空气来模拟 $3.0\text{MPa}$ 、 $700^\circ\text{C}$ 的氦气,空气的 $Pr = 0.70$ ,氦气的 $Pr = 0.67$ ,二者基本相同。

埃克特数 $Ec = u^2/(c_p \Delta T)$ ,表示动能与粘性耗散的相对重要性,适用于高速对流。对于一般工程上的流动, $Ec$ 很小,可以忽略不计。

马赫数 $Ma$ 表示气流速度与按压力和密度变化确定的特征速度(音速)的比值,是表示流体压缩性的无量纲准则。若 $Ma = 0.30$ ,则能量相对误差 $\epsilon = 2.25\%$ ,故当 $Ma < 0.30$ 时,在工程上将可压缩的气体流动作为不可压缩的气体流动处理带来的误差很小。在气混试验模型和原型氦气联箱中, $Ma$ 均小于 $0.30$ ,可以不考虑气体压缩性问题。

对试验模型的进口边界条件作简化处理,即用热和冷两股空气模拟高温堆堆芯出口具有径向连续温度和流量分布的氦气。从气流热混合的角度看,仅分为冷热两股气流的进口条件更为苛刻,温度分隔尺度更大,由此给出的试验结果用于推测原型效果趋于保守。试验中选用热气冷气流量比 $q_{v,h}/q_{v,c} = q_v/q_v = (A \cdot u_0)/(A \cdot u_0)$ 为研究参数,与流速比 $u_0/u_0$ 的作用等价。根据TMD的物理意义,在保证温度测量精度的前提下,温差比 $\Delta T_0/\Delta T_0$ 是无量纲的,对热气、冷气流体温度混合的效果TMD没有影响。

欧拉准则 $Eu$ 是非定型准则,由流动的 $Re$ 确定,即 $Eu = f(Re)$ ,用以研究混合元件的阻力特性。

综上所述,针对高温堆热气联箱的混合特性进行模拟试验研究的相似条件可归纳如下。

1) 模型中复现的过程与高温堆热气联箱的过程属于同一类物理现象,即不同温度、速度的同种气体间的混合。这2个过程服从相同的质量、动量、能量和状态方程,可用相同的物理量表示。

2) 定型准则 $Re$ 、 $Pr$ 分别相等。

3) 单值性条件相似。几何条件为按比例缩小联箱及混合元件的尺寸,保证流道形状相同;物理条件为常压空气, $Pr = 0.70$ ;边界条件需考虑流量因数 $q_{v,h}/q_{v,c}$ ,壁面、混合元件表面绝热、无滑移;时间条件为稳态连续流动。

准则关联式为:

$$TMD = f(T^*) = f(Re, Pr, q_{v,h}/q_{v,c}, \Psi) \quad (9)$$

式中:  $\Psi$  为相似形状因素。

将  $\Psi$  列入准则关系式的目的是指明混合元件的形状对混合效果的影响。在应用准则关系式时, 必须考虑关系式所对应的混合元件几何形状。设计试验系统时, 通过合理选择试验系统的几何参数, 使试验系统能尽可能地反映真实系统。在本试验系统中, 模型与高温堆热气联箱原型形状相同, 所有几何尺寸之比均为 1:1.5, 可以保证几何相似。根据相似理论, 按式(9)所示的相似准则之间的关系, 可以进行模型试验和处理数据, 并定量分析实际热气联箱的混合性能。

#### 4 试验结果

在准则关联式(9)的指导下建立模拟试验系统(图1、2), 并获得了试验结果<sup>[1]</sup>。部分试验结果示于图3。图3(a)和(b)分别示出了热气联箱混合性能 TMD 与雷诺数  $Re$  及热冷气流量比  $q_{v,h}/q_{v,c}$  的关系。可以看出,  $Re$  和  $q_{v,h}/q_{v,c}$  均对 TMD 有较显著的影响。

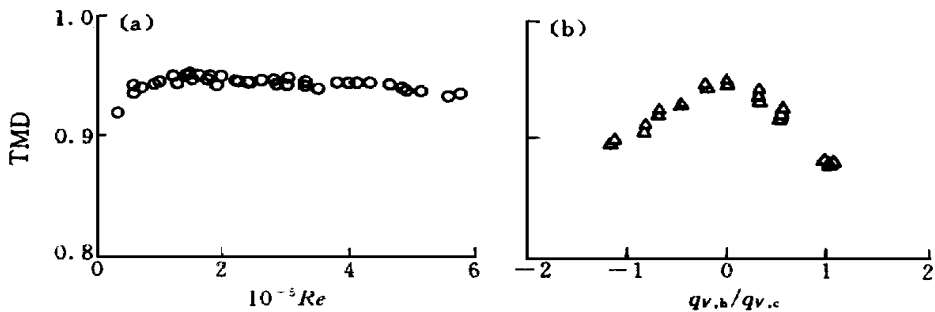


图3 热气联箱混合性能 TMD 与雷诺数  $Re$ (a) 及热冷气流量比  $q_{v,h}/q_{v,c}$ (b) 的关系

Fig. 3 Mixing performance of hot gas plenum versus Reynolds number (a) and hot-cold gas flow rate ratio (b)

#### 5 结论

1) 10MW 高温堆热气联箱混合系统的热工水力学现象可以通过模拟试验系统进行研究。在严格的模拟条件下, 实现模拟试验系统与实际混合系统有相同的热工过程。模拟试验结果完全可以适用于反应堆的实际运行工况。

2) 雷诺数  $Re$ 、普朗特数  $Pr$ 、热冷气体流量比  $q_{v,h}/q_{v,c}$ 、几何形状相似因素  $\Psi$  是影响热气联箱混合性能的主要因素, 并得以试验验证。

3) 应用相似准则指导处理试验数据, 评价热气联箱的混合性能, 使模型试验结果具有普遍适用意义, 从而为高温堆工程设计提供了有实用价值的结构和热工参数。

#### 参 考 文 献

- 1 黄志勇. 10MW 高温气冷实验堆热气联箱混合性能研究[博士学位论文]. 北京: 清华大学核能技术设计研究院, 1995

- 2 Yoshiyuki I, Kazuhiko K, Yoshiaki M, et al Thermal-hydraulic Characteristics of Coolant in the Core Bottom Structure of the High-temperature Engineering Test Reactor Nuclear Technology, 1992, 99(7): 90
- 3 Tanguy PA, Lacroix R, Choplin L. Three-dimensional Modeling of the Flow Through a LPD Down-cross Static Mixer. In: Benkreira H, ed Fluid Mixing IV. Rugby, UK: Institute of Chemical Engineering, 1990 97~ 108
- 4 Lang E, Drtina P, Streiff F, et al Numerical Simulating of the Fluid Flow and the Mixing Process in a Static Mixer Int J Heat Mass Transfer, 1995, 38(12): 2239

## THERMAL MIXING SIMILARITIES FOR THE HOT GAS PLENUM OF THE 10 MW HIGH TEMPERATURE GAS COOLED REACTOR

Huang Zhiyong Ma Changwen Yao Meisheng Xu Yuanhui

*(Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 102201)*

### ABSTRACT

One special hot gas plenum is designed under the pebble bed core of the 10 MW high temperature gas cooled reactor, so that the outlet coolant helium could be mixed sufficiently. Applying similarity theory on two-fluid model equations, several similarity laws such as Reynolds number, Prandtl number, velocity ratio, geometrical similitude are derived, which are the modeling criteria to direct the scale test. The coolant thermal mixing performance in the plenum is experimentally investigated on a small scale test model according to similarity laws, using low pressure small temperature differential air mixing to simulate high pressure large temperature differential helium mixing. The experimental results demonstrate the validity of the similarity laws and also supply structural and thermohydraulic parameters for the high temperature reactor.

**Key words** High temperature reactor Thermohydraulics Gas mixing Similarity