

CN9100183

CNIC-00306

TSHUNE-0009

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

自然循环低温供热堆硼注入质量传递模型的实验研究

THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE MASS
TRANSFER MODEL OF BORON INJECTION
FOR NATURAL CIRCULAR HEATING
REACTOR

(In Chinese)



原子能出版社

中国核情报中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00306

TSHUNE-0009

**自然循环低温供热堆硼
注入质量传递模型的实验研究**

**THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE MASS
TRANSFER MODEL OF BORON
INJECTION FOR NATURAL CIRCULAR
HEATING REACTOR**

(In Chinese)

查美生 聂孟晨 周惠忠 王利群 郭卫平 刘志勇

(清华大学核能技术研究所)

**中国核情报中心
原子能出版社**

北京·1989.9

摘 要

利用阶跃注入的扰动-响应技术,使用模拟介质,在模拟装置上,进行硼溶液注入反应堆堆芯后混合、迁移研究。实验结果表明,注入喷嘴所在的下联箱可以近似成一惯性环节,硼水混合物流经元件盒入口节流段,进入元件盒后的流动是迁移运动。本文还给出了硼水初始混合份额 η 的定义和数据关联后的准则方程。

关键词 质量传递 混合

THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE MASS TRANSFER MODEL OF BORON INJECTION FOR NATURAL CIRCULAR HEATING REACTOR

Zha Meisheng Nie Mengchen Zhou Huizhong
Wang Liqun Guo Weiping Liu Zhiyong

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

ABSTRACT

A pulse injection stimulus-response technique to study the boron mixing and transport performance after boron-loaded liquid was injected into the reactor core is described. The experiment was carried out in a simulation device. The simulation medium was used. The experimental results show that the lower plenum in where the injection point located can be simplified to one scale inertial unit and the movement of boron mixture was only transported after it had entered into the fuel elements. The definition of boron initiative mixing fraction η is also given. By using relating data a dimensionless equation is obtained.

一、引言

按照核反应堆设计安全规范规定，核反应堆应有两套独立的安全停堆系统，通常，一套是安全棒、控制棒系统；另一套是硼水注入系统。注硼系统的功能是，当不能使用控制棒、安全棒停堆时，迅速打开硼水注入系统，向反应堆堆芯注入硼溶液，利用中子吸收截面很大的硼，使其终止链式反应，关闭反应堆。

硼溶液注入反应堆后，硼在堆芯内的浓度数学模型（即浓度响应方程）是堆物理和热工设计计算不可缺少的。注硼系统是在紧急事故下使用的，对不同的堆型，由于运行的工况不同，使得注入的硼溶液和堆芯内热水之间的密度差不同，它们之间的质量流速之比、以及流场等也不同，造成堆芯内浓度响应以及硼溶液和堆芯内热水之间初始混合份额的不同。本文用阶跃注入扰动-响应技术，在清华大学核能所5MW低温核供热堆注硼模拟试验装置上，研究和分析了盐自盐水注入模拟反应堆堆芯后在堆内沉降、返回现象，得到了下联箱、元件盒和烟筒体等对象的系统特性，通过数据关联，得到了盐水初始混合份额 η 的准则方程。

二、实验原理和数据处理方法

1、阶跃响应

“扰动-响应”技术是常用的测定系统动态特性的方法，根据系统对典型输入（常用阶跃输入或脉冲输入） $x(t)$ 的响应 $y(t)$ ，确定系统的数学模型——微分方程，传递函数及差分方程等，也称回归数学模型。

阶跃响应是指系统的输入 $x(t)$ 为阶跃函数时系统的输出 $y(t)$ 。阶跃函数 $x(t)$ 为：

$$x(t) = x_0 \cdot 1(t) = \begin{cases} x_0, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

其中：

$$1(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}$$

当系统为线性或近似线性时，其阶跃响应 $y(t)$ 的曲线如图1所示。

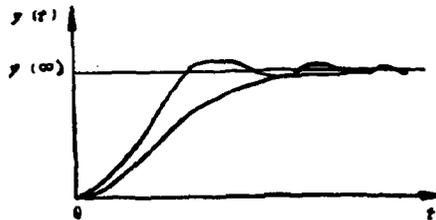


图1 阶跃响应曲线

从时域上讲,若响应为非周期阶跃响应,其动态指标通常用时间常数和延迟时间来衡量,

2. 时间域最小二乘估计差分方程的系数

(1) 系统的差分方程

设系统输入 $x(t)$ 和输出 $y(t)$ 的采样值分别为: $x(i)=x(i\Delta t)$; $y(i)=y(i\Delta t)$, 其中 Δt 为采样间隔时间。则 n 阶系统的差分方程通常用下述的形式表示:

$$y(i) = \sum_{k=1}^n A_k y(i-k) + \sum_{j=0}^m B_j x(i-j) \quad (1)$$

式(1)的含义是第 $i\Delta t$ 时系统输出的采样值,是由历史上的 n 个输出、 m 个输入及当时的输入 $B_0 x(i)$ 决定的。

当系统输入 $x(t)$ 为阶跃函数时,式(1)变成:

$$y(i) = \sum_{k=1}^n A_k y(i-k) + B_0 x(i) \quad (2)$$

或

$$y(i) = \sum_{k=1}^n A_k y(i-k) + B_0 x_0 \quad (i > 0) \quad (3)$$

(2) 时间域最小二乘法估计差分方程的系数

系统在阶跃输入下,由动态测试得到一组测量列: $x(i), y(i)$; 如果只存在噪声 $m(i)$, 则(3)式表示为:

$$y(i) = \sum_{k=1}^n A_k y(i-k) + B_0 x_0 + m(i) \quad (4)$$

当 i 取 $n, n+1, \dots, N$ 时,可列出 $N-n+1$ 个联立方程,用矩阵表示:

$$Y = ZH + M \quad (5)$$

其中:

$$Y = \begin{pmatrix} y(n) \\ y(n+1) \\ \vdots \\ y(N) \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ B_0 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} m(n) \\ m(n+1) \\ \vdots \\ m(N) \end{pmatrix} \quad Z = \begin{pmatrix} y(n-1) & \cdots & y(0) & x_0 \\ y(n) & \cdots & y(1) & x_0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y(N-n) & \cdots & y(N-1) & x_0 \end{pmatrix}$$

设测量值的估计为:

$$\hat{y}(i) = \sum_{k=1}^n \hat{A}_k y(i-k) + \hat{B}_0 x_0$$

参照式 (5)，则有

$$\hat{Y} = Z\hat{H} \quad (6)$$

其中 \hat{Y} 为 Y 的估计， \hat{H} 为 H 的估计，而 \hat{H} 为

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} \hat{A}_1 \\ \vdots \\ \hat{A}_N \\ \hat{B}_0 \end{pmatrix}$$

设残差 $E = Y - \hat{Y} = Y - Z\hat{H}$ (7)

取残差 E 平方和为最小来求 \hat{H} ，令

$$J = E^T E \quad (8)$$

通过令

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{H}} = 0$$

求得差分方程系数的估计： $\hat{H} = (Z^T Z)^{-1} Z^T Y$ (9)

式 (9) 就是参数的最小二乘估计。如果数据长度较长、信噪比较大，则最小二乘估计是比较准确的。

3. 物料平衡方程

参见图2，对下联箱运用物料平衡原理，建立系统的微分方程，在导出方程时，假定盐水一进入下联箱，立即均匀混合。

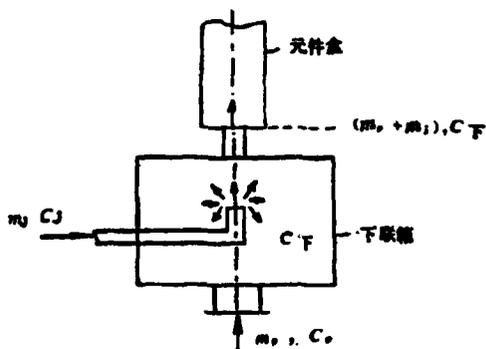


图2 物料平衡图

盐量增加率 = 进入盐率 - 流出盐率

运用上述平衡原理得下列微分方程：

$$\tau_F \frac{dC_F}{dt} + C_F = KC,$$

其中：

$$\tau_F = \frac{\rho_F V_F}{m_1 + m_2} \quad (\text{时间常数})$$

$$K = m_j / (m_p + m_j) \quad (\text{放大倍数})$$

式中 ρ_F 为下联箱中流体的密度, V_F 为下联箱的体积, m_p 为下联箱进口质量流量, m_j 为注入质量流量, C_F 为下联箱内的浓度, C_j 为注入浓度, τ_F 为时间常数。

方程 (10) 的初始条件是, $t=0$, $C_F=0$, 得方程 (10) 的解是:

$$C_T(t) = KC_F(1 - e^{-t/\tau_F}) \quad (11)$$

即为下联箱浓度响应方程。

若式 (3) 中取 $k=1$ (即取一阶差分方程) 得:

$$C_F(i) = A_1 C_F(i-1) + B_0 x_0 \quad (12)$$

把微分方程 (10) 改写成差分形式得:

$$C_T(i) = \frac{\tau_c}{\tau_F + \Delta t} C_T(i-1) + KC_j(i) \quad (13)$$

比较式 (12) 和 (13) 得:

$$\tau_F = \frac{A_1 \Delta t}{1 - A_1} \quad (14)$$

这是由差分方程系统求解时间常数 τ_F 的计算式。

4. 浓盐水和主回路水初始混合份额及数据关联

浓盐水自喷嘴注入下联箱时, 有一部分立即被主流体稀释, 载带而随主流体一道上升, 进入元件盒, 另一部分由于密度差产生下沉, 在下沉过程中不断地稀释, 其中一部分又上升, 这个过程不断地进行, 直至平衡为止。定义浓盐水进入下联箱, 立即与主流体混合、上升到元件盒中的盐量占总注入盐量的份额为盐水初始混合份额 η 。显然, 浓盐水在下联箱中的上升、下沉和返回现象, 其物理过程是盐水被主流体稀释, 载带的过程, 而 η 值取决于这个过程的快慢, 必然与这两股混合流体的质量流速有关。我们定义 $UMN = \rho_j W_j / \rho_p W_p$ 为上升质量数, 式中 ρ_j, W_j 为注入流体的密度和流速, ρ_p, W_p 为主流体的密度和流速。

根据 η 的定义, 参考图 2, 当系统达到平衡时, 元件盒中的浓度是总注入盐水 m_j 被主流体 m_p 稀释后的平衡浓度, 即, 此时元件盒中的浓度 $C_{\bar{x}}$ 乘以 $(m_p + m_j)$ 代表总的注入盐量, 下联箱中喷嘴下方的平均浓度 \bar{C}_T 乘以 $(m_j(1-\eta) + m_p)$, 代表下沉到下联箱中的盐量, 由 η 的定义可知:

$$\eta = 1 - \frac{\bar{C}_T [m_j(1-\eta) + m_p]}{C_{\bar{x}}(m_p + m_j)} \quad (15)$$

从中解出 η

$$\eta = 1 - \frac{\bar{C}_T m_j}{(C_{\bar{x}} m_p + C_{\bar{x}} m_j - C_T m_j)} \quad (16)$$

由于 m_p 和 m_j 一般相差甚大, 所以 η 的近似计算公式为:

$$\eta \approx 1 - \frac{\bar{C}_T}{C_{\bar{x}}} \quad (17)$$

三、实验和测量

实验回路和测量系统简图如图3所示，由大水箱[5]、大泵[4]、调节阀[3]、涡轮流量计[2]、下联箱[11]、元件盒入口段[10]、元件盒[8]、烟筒体[7]和排出管[6]组成主回路，模拟堆内热水的流动；由盐水箱[17]、注入泵[16]、调节阀[15]、螺旋管流量计[14]、电磁阀[13]和喷嘴[12]组成副回路，模拟硼溶液的注入系统，盐水的阶跃输入是由计算机控制的电磁阀[13]产生的，在下联箱[11]、元件盒[8]和烟筒体[7]的轴向位置上布有供浓度测量用的取样管[9]，由电极[18]连续地取得浓度信息。试验在一台IBM-PC/XT计算机、数据采集板组成的数据采集/控制系统[1]的控制下进行的，实时地采集浓度信息，并以文件形式保存，随后离线处理数据。

整个实验的程序框图如图4所示，数据处理辨识系统特性和求解下联箱时间常数的程序框图如图5所示，盐水初始混合份额 η 的求解和数据关联的程序框图如图6所示。

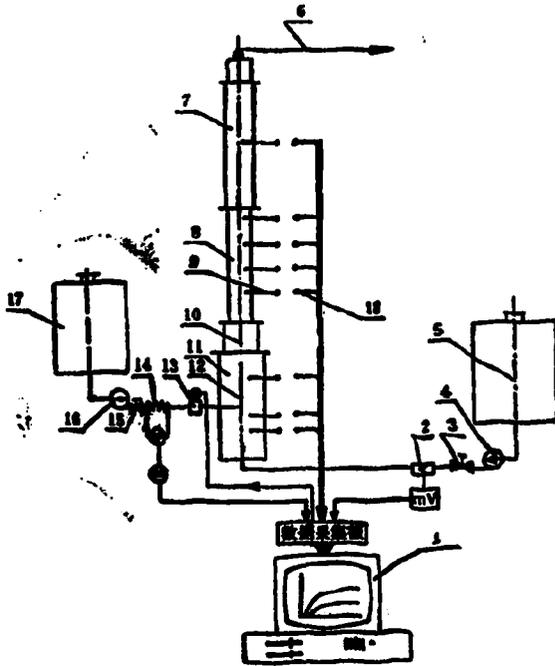


图3 实验及测量系统简图

四、实验结果

1. 系统特性辨识结果

实验数据处理结果表明，盐水在下联箱中和主流体水进行混合，进入元件盒后的流动是迁移，下联箱中的混合数学模型可用一阶微分方程来描述。图7是某一工况时下联箱、元件

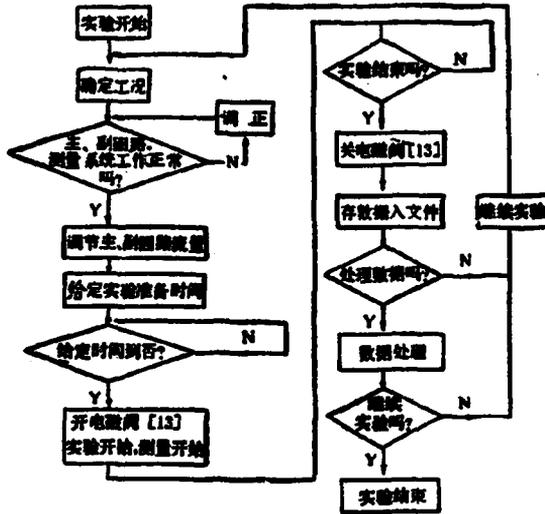


图 4 实验程序框图

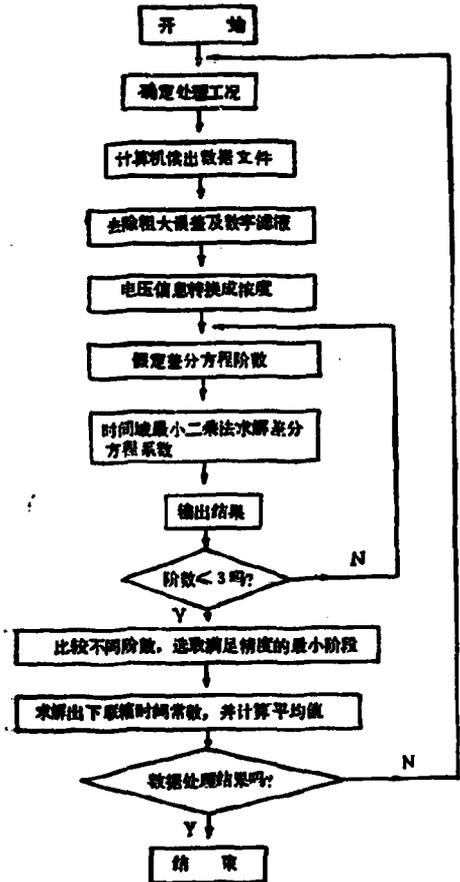


图 5 识辨特性框图

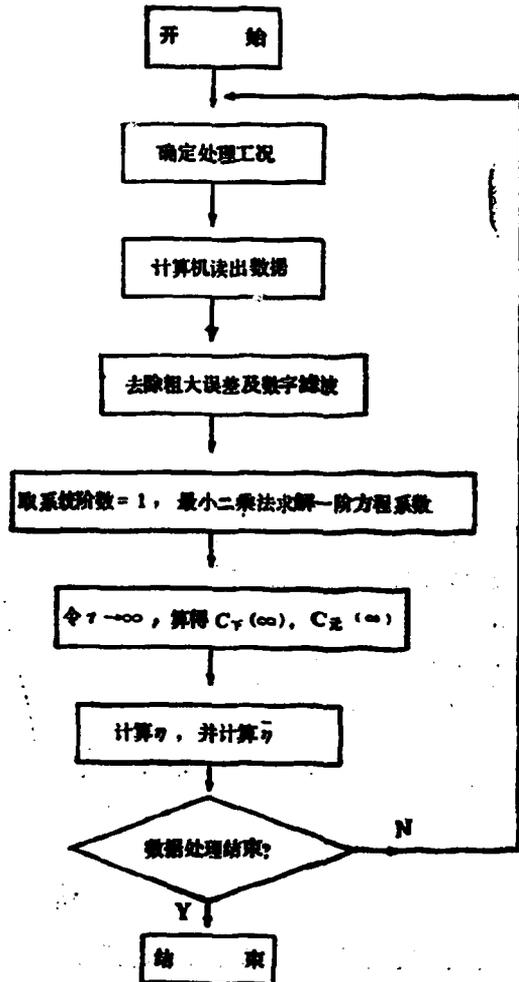


图 6 求解及数据关联框图

盒中不同轴向位置处浓度响应曲线。表1是2种不同喷嘴位置时实验测定的下联箱时间常数和理论计算值，图8是表1的曲线图。

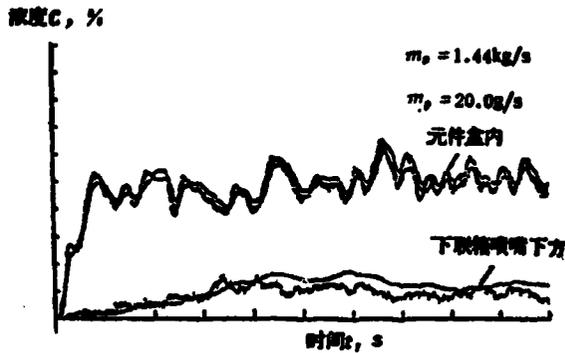


图7 浓度响应曲线

表 1 下联箱时间常数

主回路水流量, kg/s		0.36	0.72	1.08	1.44
下联箱时间常数 τ, s	喷嘴位置 1	115.3	58.2	32.8	23.1
	喷嘴位置 2	145.3	59.8	36.7	25.9
	理论计算值	114.5	57.5	37.5	28.7

下联箱、元件盒中浓度响应方程是：

$$C_T(t) = KC_j(1 - e^{-t/\tau_T}) \quad (18)$$

$$C_T(t) = \begin{cases} 0 & , t \leq \tau \\ KC_j(1 - e^{-(t-\tau)/\tau_T}) & , t > \tau \end{cases} \quad (19)$$

式中 $K = m_j / (m_j + m_s)$, m_j 为盐水注入流量, m_s 为主回路水流量, τ_T 为下联箱时间常数, τ 为延迟时间, $\tau = L/W$, L 为迁移距离, W 为迁移速度。

2. 盐水初始混合份额 η 数据关联结果

根据第5页第4节的分析, 用图6所示的程序框图计算出各种工况下的 η 值, 结合UMN数, 得到图9所示的 $\eta \sim \text{UMN}$ 数曲线。

对图9所示的曲线进行回归分析, 得到如下的 $\eta \sim \text{UMN}$ 数准则方程:

$$\eta = \frac{235.1}{(\text{UMN})^{0.760}} \quad (20)$$

五、结 论

1. 实验研究结果表明, 翻液注入嘴所在的下联箱可以近似为一阶惯性环节, 其时间常

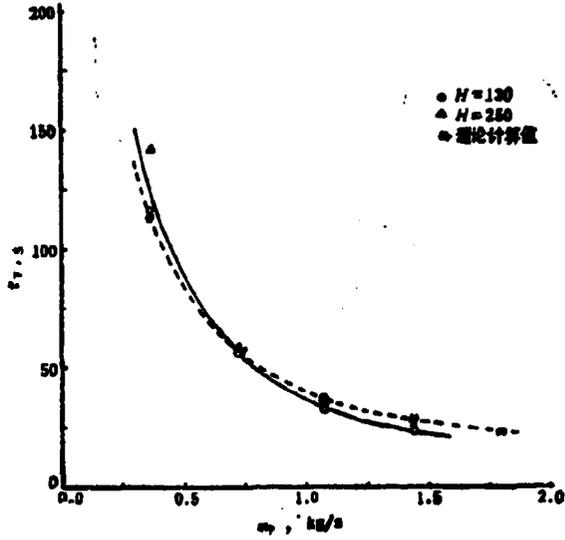


图 8 时间常数实验值与理论值的比较

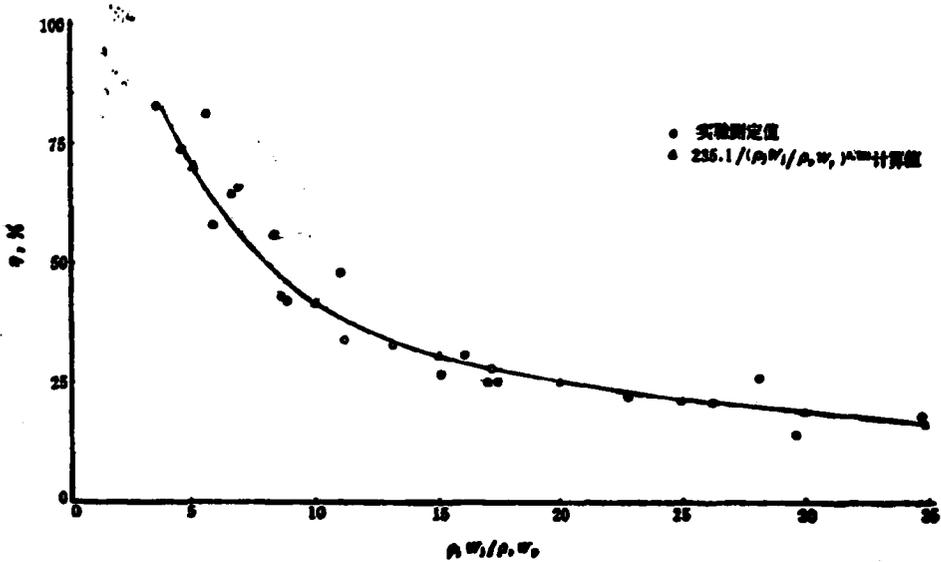


图 9 $\eta \sim \text{UMN}$ 数曲线

数 τ_T 可用公式 $\tau_T = \rho_T V_T / (m_p + m_1)$ 计算。

2. 硼水混合物进入元件盒以后的流动为迁移运动。
3. 注入硼溶液和主流体水之间的初始混合份额 η 和 $(\rho_1 W_1 / \rho_2 W_2)$ 之间有如下关

$$\eta = \frac{235.1}{(\rho_1 W_1 / \rho_2 W_2)^{0.750}}$$

本实验研究得到佟允亮副教授的许多支持，在此表示感谢。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT



书号: 15175-00306

P.O.Box 2103

Beijing, China

China Nuclear Information Centre